



KfK 3373

Mai 1983

# **Unfallfolgenrechnungen und Risikoabschätzungen für Druckwasserreaktoren mit dem Rechenprogramm UFOMOD/B3**

J. Ehrhardt, S. Vogt

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Hauptabteilung Sicherheit

Projekt Nukleare Sicherheit

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Hauptabteilung Sicherheit

Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3373

Unfallfolgenrechnungen und Risikoabschätzungen für  
Druckwasserreaktoren mit dem Rechenprogramm UFOMOD/B3

J. Ehrhardt, S. Vogt

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Unfallfolgenrechnungen und Risikoabschätzungen für Druckwasserreaktoren mit dem Rechenprogramm UFOMOD/B3

### Kurzfassung

Im Hinblick auf die Anwendung des für Leichtwasserreaktoren entwickelten Unfallfolgenmodells der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" (DRS) bei Risikoabschätzungen für andere Reaktortypen (Hochtemperaturreaktor HTR-1160, Schneller Brutreaktor SNR-300) wurde die verbesserte Version UFOMOD/B3 erstellt. Die Modifikationen betreffen hauptsächlich die atmosphärischen Ablagerungsvorgänge, den Resuspensionsprozeß, das Ingestionsmodell und die Dosisfaktoren. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die Rechnungen für Druckwasserreaktoren mit den Freisetzungskategorien der DRS wiederholt.

Die Ergebnisse zeigen gegenüber den in der DRS dokumentierten Resultaten eine deutliche Reduktion des Risikos für akute Todesfälle (Frühschäden) um den Faktor 3,6. Dies ist vor allem auf die verringerte Ablagerung zurückzuführen. Das Risiko stochastischer somatischer Schäden (Spätschäden) dagegen bleibt nahezu unverändert.

Accident Consequence Calculations and Risk Assessments for  
Pressurized Light Water Reactors with the Computer Code  
UFOMOD/B3

Abstract

With respect to the application of the accident consequence model of the German Risk Study (GRS) for light water reactors to risk assessments of other reactor types (high temperature reactor HTR-1160, fast breeder reactor SNR-300), the improved version UFOMOD/B3 was developed. The modifications mainly concern the deposition parameters, the resuspension process, the ingestion model and the dose factors. To make results comparable, recalculations for pressurized light water reactors were performed with the release categories of the GRS.

The results show in contrast to the findings of the GRS a significant reduction of the acute fatality risk by a factor of 3.6. This essentially results from the smaller deposition parameters. The latent fatality risk was calculated nearly unchanged.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Modellmodifikationen	5
2.1 Modell der atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung	5
2.1.1 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung	5
2.1.2 Windrichtungsänderungen	5
2.1.3 Ablagerung	6
2.1.4 Resuspensionsmodell	6
2.2 Dosismodell	7
2.2.1 Dosisfaktoren	8
2.2.2 Inkorporationsdaten	9
3. Deterministische Ergebnisse	10
3.1 Einführung	10
3.2 Potentielle Dosis durch externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne	10
3.3 Potentielle Dosis durch externe Bestrahlung vom Boden	11
3.4 Zeitabhängiger Verlauf der potentiellen Inhalationsdosis	12
3.5 Potentielle Dosis durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität infolge Resuspension	13
3.6 Potentielle Dosis durch Ingestion	13
4. Probabilistische Ergebnisse	15
4.1 Darstellungsformen	15
4.2 Kollektivschäden und ihre Häufigkeitsverteilungen	16
4.2.1 Frühschäden	16
4.2.2 Spätschäden	17
4.2.3 Genetische Belastung	19
4.3 Von Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffene Flächen und Personen	20
4.4 Entfernungsabhängige Individualrisiken	23
4.5 Kollektivrisiken und Erwartungswerte der genetisch signifikanten Kollektivdosen sowie der von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen	23
5. Zusammenfassung, Ausblick	25
Literaturverzeichnis	27
Tabellen	31
Abbildungen	60

## 1. Einleitung

Im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie wird unter Federführung der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) die "Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke" (DRS) durchgeführt. Ziel dieser Studie ist die Abschätzung der individuellen und kollektiven Risiken, die mit dem Betrieb von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland verbunden sind. Im Rahmen der inzwischen abgeschlossenen Phase A dieser Studie wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe das Unfallfolgenmodell UFOMOD entwickelt. Die damit erzielten Ergebnisse bzgl. der häufigkeitsbewerteten radiologischen Folgen von unfallbedingten Aktivitätsfreisetzungen aus Druckwasserreaktoren (DWR) vom Typ Biblis B wurden in /1, 2/ dokumentiert. Die Programmbeschreibung von UFOMOD ist in /3/ veröffentlicht.

Im Rahmen der jetzigen Phase B der DRS ist vorgesehen, alle im Rechenprogramm enthaltenen Modelle und Datensätze, die sich in vielen Teilen noch an das Unfallfolgenmodell der amerikanischen "Reactor Safety Study" (WASH-1400) /4/ anlehnen, zu überarbeiten und dabei neuere wissenschaftliche Erkenntnisse und veränderte Vorgehensweisen zu berücksichtigen.

Durch die Planung und den Bau weitere Reaktortypen (HTR-1160, SNR-300) entstand der Wunsch, auch für diese Anlagen Risikoabschätzungen durchzuführen, um einen quantitativen Vergleich zu den DWR zu ermöglichen. Die Freisetzungsdaten allein geben zwar bereits erste Hinweise auf mögliche Folgen in der Umwelt, eine quantitative Beurteilung verschiedener Szenarien kann wegen der großen Unterschiede in der radiologischen Bedeutung einzelner Radionuklide sowie dabei möglicher Schwelleneffekte jedoch erst nach der Berechnung der Unfallfolgen durchgeführt werden.

Bei der Anwendung des für die Phase A der DRS entwickelten Unfallfolgenmodells auf die genannten Reaktortypen und ihre jeweiligen Standorte galt es folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die Anteile der unfallbedingten Freisetzungen einzelner Radionuklide unterscheiden sich beim HTR-1160, SNR-300 und DWR
- Die Risikoabschätzungen sind für Einzelstandorte durchzuführen.
- Seit Beendigung der Phase A der DRS liegen wesentliche neuere wissenschaftliche Erkenntnisse vor.



Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß es für die verschiedenen Studien nicht möglich war, die Entwicklung des Unfallfolgenmodells der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke", Phase B abzuwarten, bei der diese Gesichtspunkte berücksichtigt werden, wurde bezüglich der oben aufgeführten Gesichtspunkte wie folgt vorgegangen:

zu A.) Druckwasserreaktoren - andere kerntechnische Anlagen

Andere kerntechnische Anlagen, wie z. B. Schnelle Brutreaktoren /6/, haben gegenüber Druckwasserreaktoren ein relativ hohes Inventar an Aktiniden. Um den Einfluß der Aktiniden auf die Unfallfolgen besser zu erfassen, wurden folgende Modifikationen am Unfallfolgenmodell durchgeführt:

- das für aride Klimazonen konzipierte Resespensionsmodell, wie es in der amerikanischen Studie verwendet und in der DRS unverändert übernommen wurde, wurde durch ein Modell ersetzt, das die Vorgänge im humiden Klima, wie es in Europa herrscht, besser beschreibt. Damit wird die Belastung über diesen Expositionspfad realistischer geschätzt.
- die Aktiniden wurden beim Expositonspfad Ingestion (= Nahrungsmittelaufnahme) im Rechenmodell berücksichtigt. Sie waren bisher im Unfallfolgenmodell der DRS nicht enthalten.

zu B.) Kollektiv von Kernkraftwerken - kerntechnische Anlagen an einem speziellen Standort

Im Rahmen der DRS wurde das Unfallfolgenmodell UFOMOD mit der Zielsetzung entwickelt, das Risiko abzuschätzen, das aus dem Betrieb von 25 Kernkraftwerken an 19 Standorten in der Bundesrepublik Deutschland resultiert. Die Rechenmodelle und die zugehörigen Parameter- und Datensätze sind deshalb derart gewählt, daß die zu beschreibenden Vorgänge im Mittel annähernd richtig berechnet werden. Dieses Vorgehen ist trotz in Einzelfällen möglicher Abweichungen von den Durchschnittswerten erlaubt, wenn die zur Risikoabschätzung notwendige Mittelwertbildung aus einer Vielzahl von Beiträgen erfolgt.

Für Einzelstandorte ist diese Betrachtungsweise nur noch mit Einschränkungen zulässig, da regionale Gegebenheiten erhebliche Abweichungen vom mittleren Modellverhalten bedingen können. Ergebnisse von Risikoabschätzungen für Einzelstandorte sind darum unter dem Gesichtspunkt der im verwendeten Unfallfolgenmodell enthaltenen Vereinfachungen zu betrachten. So können im Modell derzeit topographische Daten sowie Spezifika der Flächennutzung nicht berücksichtigt werden, und auch die Modellierung der Schutz- und Gegenmaßnahmen ist nahezu unabhängig von standortspezifischen Gegebenheiten.

Um dennoch den Anforderungen von Risikoabschätzungen für Einzelstandorte Rechnung zu tragen, wurde das Rechenprogramm UFOMOD in einzelnen Punkten hinsichtlich der Gegebenheiten an den jeweiligen Standorten überprüft und - soweit möglich - ertüchtigt. So werden die Wetterdaten der den Standorten nächstliegenden Meßstationen sowie die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen in Standortnähe verwendet. Außerdem werden im Rechenprogramm Windrichtungsänderungen während des Ausbreitungsvorgangs der Aktivitätsfahne berücksichtigt.

#### zu C.) Neuere wissenschaftliche Erkenntnisse

Seit der ersten Konzeption des Unfallfolgenmodells liegen neuere wissenschaftliche Untersuchungen vor; von Bedeutung sind

- neuere Erkenntnisse bezüglich der Deposition von Radionukliden bei trockenen Wettersituationen und bei Niederschlag, sowie
- die jüngsten Empfehlungen der "International Commission on Radiation Protection" (ICRP) bezüglich des metabolischen Verhaltens der Radionuklide im menschlichen Körper.

Aus diesem Grunde wurden neuere Ablagerungsgeschwindigkeiten und Wash-out-Koeffizienten sowie neuere Dosisfaktoren verwendet.

Auf die genannten Modifikationen wird in den folgenden Abschnitten im Detail eingegangen. Bei allen nicht speziell angesprochenen Punkten wurden die im Fachband 8 der DRS /2/ beschriebenen Modelle und Parameter des Unfallfolgenmodells unverändert übernommen. Mit dem derart verbesserten Rechenprogramm UFOMOD/B3 wurden die Risikoabschätzungen zum HTR-1160 /5/ und SNR 300 /6/ durchgeführt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden die Rechnungen für unfallbedingte Freisetzungen aus DWR nach der DRS Phase A wiederholt. Das Aktivitätsinventar der Referenzanlage Biblis B und die Daten der acht Freisetzungskategorien sind in Tab. 1 und Tab. 2 angegeben. Die damit erzielten Ergebnisse der Unfallfolgenrechnungen werden im vorliegenden Bericht analog zur Darstellung im Fachband 8 der DRS /2/ ausführlich dokumentiert.

## 2. Modellmodifikationen

### 2.1 Modell der Atmosphärischen Ausbreitung und Ablagerung

#### 2.1.1 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung

Das in /2/ beschriebene Unfallfolgenmodell nimmt an allen 19 Standorten eine Gleichverteilung der Windrichtung an. In /7/ wird für mehrere Standorte in der Oberrheinischen Tiefebene exemplarisch gezeigt, daß eine Berücksichtigung der tatsächlichen Richtungsverteilung zwar den Schadensumfang an frühen Todesfällen nicht beeinflusst, daß sich jedoch das Kollektivrisiko in Abhängigkeit von der betrachteten Freisetzungskategorie um bis zu 20 % verändert.

Die Beschaffung der Windrichtungsverteilung aller betrachteten Standorte ist über den Deutschen Wetterdienst in die Wege geleitet. Es erscheint allerdings fraglich, ob die Daten für alle Standorte zur Verfügung gestellt werden können, da an manchen Standorten keine meteorologischen Messungen durchgeführt werden und die Übertragung von in der Nähe liegenden Stationen problematisch ist.

#### 2.1.2 Windrichtungsänderungen

Das Rechenprogramm UFOMOD /3/ enthält als Option ein Modell zur Berücksichtigung von Windrichtungsänderungen während des Ausbreitungsvorgangs. Es beruht auf einer azimutalen Versetzung der aus den einzelnen Freisetzungsphasen resultierenden Verteilungen in jedem Kreisring /8/. Dieses "Trajektorienmodell" ist insbesondere dann anzuwenden, wenn standortspezifische Risikoabschätzungen für Freisetzungen mit zeitlich auseinanderliegenden Freisetzungsphasen durchzuführen sind. Durch diese Modellverbesserung ist also zu erwarten, daß vor allem bei mehrstündigen Emissionen eine realistischere Berechnung der Aktivitäts- und Konzentrationsfelder erreicht wird.

### 2.1.3 Ablagerung

Aufgrund neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse seit Abschluß der DRS Phase A wurden für Ablagerung und Auswaschung realistischere Parameterwerte verwendet, deren Beibehaltung im Rahmen der DRS-Phase B vorgesehen ist /9/. Danach betragen die Ablagerungsgeschwindigkeiten (trockene Ablagerung) für elementares Jod  $v_d = 0,01$  m/s und für Aerosole  $v_d = 0,001$  m/s. Der Wert für Aerosole fügt sich gut in den Wertebereich neuerer Untersuchungen ein /10/. Außerdem werden in einem neueren Bericht des englischen "National Radiation Protection Boards" für den Standort Sizewell /11/ für elementares Jod und für Aerosole dieselben Werte wie hier verwendet. Die nasse Ablagerung, charakterisiert durch die washout-Koeffizienten, beruht im wesentlichen auf Ergebnissen, die in /12, 13/ beschrieben sind:

Niederschlags- intensität [mm/h]	washout-Koeffizienten [s <sup>-1</sup> ]	
	elementares Jod	Aerosole
< 1	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
1 - 3	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$
> 3	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$3,40 \cdot 10^{-4}$

Edelgase werden weder trocken noch naß abgelagert.

### 2.1.4 Resuspensionsmodell

Der Zusammenhang zwischen der Aktivitätskonzentration am Boden und der Aktivitätskonzentration der Luft aufgrund der Resuspension abgelagerter Radionuklide wird durch den Resuspensionsfaktor  $r(t)$  beschrieben. Bezüglich seines zeitabhängigen Verhaltens wurden in der DRS Phase A die Modellannahmen aus WASH-1400 /4/ übernommen:

$$r(t) = r_0 \cdot e^{-\lambda_r t} + r_e$$

mit

$$r_0 = 10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

$$r_e = 10^{-9} \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda_r = 2,15 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} \text{ (} T_{1/2} = 1,02 \text{ a)}$$

Die Zahlenwerte der den Exponentialterm in obiger Gleichung bestimmenden Parameter beruhen auf der Auswertung von Experimenten in ariden Klimazonen /4/. Es wird seit längerem darauf hingewiesen, daß sowohl die Amplitude  $r_0 = 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  als auch die Halbwertszeit  $T_{1/2} \approx 1 \text{ a}$  die Resuspension im humiden Klima überschätzt. Stellvertretend für die Vielzahl der neueren Veröffentlichungen zu diesem Problemkreis seien hierfür die Berichte /14, 15, 16/ angeführt. Wie in diesen Arbeiten vorgeschlagen, wird im Modell die Halbwertszeit auf 1 - 2 Monate reduziert. Weiterhin wird in den genannten Arbeiten für die Amplitude  $r_0 = 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  vorgeschlagen, allerdings mit der Einschränkung, für urbane Gebietsstrukturen wegen mangelnden Datenmaterials weiterhin  $r_0 = 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  zu verwenden. Aus diesem Grund wurden die schon in /17/ als Berechnungsgrundlage für schnelle Brutreaktoren empfohlenen Zahlenwerte

$$r_0 = 10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

$$r_e = 10^{-9} \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda_r = 5,1 \text{ a}^{-1} \text{ (} T_{1/2} = 0,136 \text{ a)}$$

zur Berechnung der Strahlenbelastung infolge Resuspension herangezogen.

## 2.2 Dosismodell

Die Unfallfolgenrechnungen der DRS Phase A basieren auf einem Dosismodell, in das für alle betrachteten Expositionspfade und Organe die Dosisfaktoren aus WASH-1400 /4/ eingingen. Aufgrund neuerer Empfehlungen der ICRP /18/

ergeben sich - vor allem bei den Aktiniden - z. T. erheblich höhere Zahlenwerte für die Dosisfaktoren bezüglich Inkorporation. Außerdem erforderte die Erweiterung der Nuklidliste beim Ingestionspfad die Neuberechnung von Inkorporationsdaten und Dosisfaktoren für Transurane.

### 2.2.1 Dosisfaktoren

Sämtliche Dosisfaktoren für die Expositionspfade "Inhalation" und "Ingestion" wurden aus dem Dosismodell des vom englischen "National Radiation Protection Board" NRPB ausgearbeiteten Unfallfolgenmodells MARC /19, 20/ übernommen, in denen die Empfehlungen der ICRP bereits eingearbeitet sind. Bei den Dosisfaktoren für den Expositionspfad "Inhalation" wurden die Partikelgröße " $1\mu\text{m}$ " und i. a. die chemische Form "Oxid" zugrundegelegt. Die aufbereiteten Daten wurden direkt in das Rechenprogramm zur Berechnung der effektiven Schadensfaktoren nach /21/ implementiert. Eine Dokumentation der erstellten Datensätze befindet sich in /22/.

Im Rahmen der Überarbeitung des Dosismodells wurden auch die Dosisfaktoren für den Expositionspfad "Externe Bestrahlung vom Boden" durch einen neuen Datensatz ersetzt, der auf den Ergebnissen des ORNL /23/ basiert. Er ist ebenfalls - zusammen mit den zugehörigen effektiven Schadensfaktoren - in /22/ angegeben.

Im Einzelnen wurden folgende Verbesserungen durchgeführt:

Implementierung neuer Dosisfaktoren nach ICRP 30 für die Organe Ganzkörper, Knochenmark, Lunge, Gonaden, Knochenoberfläche und Schilddrüse und die Expositionspfade

- Inhalation von luftgetragenen Radionukliden aus der Aktivitätsfahne (IH)
- Inhalation von resuspendierten Radionukliden, die schon am Boden abgelagert waren (IHR); dabei Anwendung des Resuspensionsmodells nach Abschnitt 2.1.4

- Inkorporation von Radionukliden über die Nahrungsmittelaufnahme (Ingestion IG).

Implementierung neuer Dosisfaktoren für den Expositionspfad "Externe Bestrahlung vom Boden (EB)" nach ORNL /23/ unter Berücksichtigung der Tochternuklide.

### 2.2.2 Inkorporationsdaten

Wegen der erhöhten Bedeutung der Transurane bei Schnellen Brutreaktoren /6/ wurde das Ingestionsmodell um die Isotope Sr-89, Sr-90, J-131, J-133, Cs-134, Cs-136, Cs-137, Np-239, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Am-241, Cm-242, Cm-244 erweitert. Die zugehörigen Inkorporationsdaten sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Die Bestimmung der "normierten integralen Aktivitätsinkorporation" - darunter ist die aus dem Verzehr von kontaminierten Nahrungsmitteln resultierende Aktivitätsinkorporation aufgrund einer einmaligen Oberflächenkontamination von Erdboden und Bewuchs ( $C_i$  ingestiert pro  $C_i/m^2$ ) zu verstehen -, beruht auf einer Analyse des Verhaltens und der Verteilung von Transuranen in Nahrungsketten. Dabei wurde zwischen vier verschiedenen Nahrungsmittelgruppen, pflanzlichen und tierischen Ursprungs (Blattgemüse, sonstige pflanzliche Produkte, Milch- und Milchprodukte, Fleisch und Fleischwaren) sowie vier Altersgruppen der Bevölkerung (Kleinkinder, Kinder, Jugendliche und Erwachsene) unterschieden. Das den Untersuchungen zugrundeliegende terrestrische Transportmodell folgt in seinen Grundzügen den Überlegungen, die üblicherweise zur Beurteilung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen zugrunde gelegt werden. Zur Genauigkeit der Ergebnisse ist jedoch anzumerken, daß der für eine detaillierte Betrachtung erforderliche Kenntnisstand bei Transuranen z. T. sehr beschränkt und lückenhaft ist, so daß die Ergebnisse einen gewissen schwer zu quantifizierenden Unsicherheitsspielraum aufweisen. Die Einzelheiten der Untersuchung sind zusammenfassend in /24/ dokumentiert.



### 3. Deterministische Ergebnisse

#### 3.1 Einführung

Wie im Fachband 8 der DRS /2/ beschrieben, handelt es sich bei den deterministischen Ergebnissen um Unfallfolgenrechnungen, die noch nicht mit ihren Eintrittshäufigkeiten verknüpft sind. Um einen direkten Vergleich der Ergebnisse des Fachbandes 8 und den Rechnungen mit UFOMOD/B3 zu ermöglichen, wurden dieselben Rechenfälle ausgewählt.

So ist den Ergebnissen der folgenden Abschnitte die Freisetzungskategorie FK2 zugrundegelegt, die Unfälle mit Kernschmelzen und großer Leckage des Sicherheitsbehälters repräsentiert. Alle Organdosen werden für den Wetterablauf "neutral" der Tab. F8, 8 - 1 aus /2/ berechnet. Der Aufpunkt für die gezeigten Ortsdosen befindet sich in 10 km Entfernung unter der Aktivitätsfahnenachse.

#### 3.2 Potentielle Dosis durch externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne

Abb. 1 zeigt die potentielle Dosis durch externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne für die Organe Knochenmark, Ganzkörper, Schilddrüse und Lunge. Die Reihenfolge der Nuklide in Bezug auf ihren Beitrag zur Gesamtdosis ist gegenüber dem Bild F8, 8 - 5 (1) aus dem Fachband 8 der Deutschen Risiko-studie /2/ unverändert. Dies gilt für alle dargestellten Nuklide. Auf eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Dosis für den Wetterablauf "Regen" wie in /2/ kann daher verzichtet werden.

### 3.3 Potentielle Dosis durch externe Bestrahlung vom Boden

Die zeitliche Entwicklung der Beiträge der einzelnen Nuklide wurde in /2/ im doppellogarithmischen Maßstab dargestellt (Abbildungen F8, 8-6(1) bis 8-6(5)). Eine solche Darstellung ist zwar informationsintensiv, aber dafür benutzerunfreundlich. Im vorliegenden Bericht werden daher die Ergebnisse in zwei getrennten Darstellungen gezeigt.

In Abb. 2 ist die Gesamtdosis, resultierend aus den Beiträgen aller 54 Nuklide, für die Organe Knochenmark, Lunge und Schilddrüse dargestellt. Die Ganzkörperdosis ist nahezu gleich der Lungendosis. Sie wird daher nicht extra aufgeführt.

Die Abbildungen 3 bis 6 enthalten dann die Aufschlüsselung in die Beiträge der einzelnen Nuklide für die Organe Knochenmark, Lunge, Schilddrüse und Ganzkörper. Dargestellt ist der Beitrag einzelner Nuklide bzw. Nuklidgruppen zur Gesamtdosis in Prozent, die sich innerhalb der vorgegebenen Zeit aufbaut. Die absolute Höhe der Gesamtdosis in den Zeiträumen 0 - 4h, 0 - 24h, 0 - 7d, 0 - 1a, 0 - 10a und 0 - 50a kann der Abb. 2 entnommen werden.

Am Beispiel der Knochenmarksdosis (Abb. 3), die zur Berechnung der Fröh-schäden herangezogen wird, sollen grundsätzliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen in /2/ und den jetzigen Rechnungen gezeigt werden.

Nach einer Bestrahlungszeit von 4 h ist der Jodbeitrag zur Gesamtdosis gegenüber früheren Ergebnissen um etwa den Faktor 1,4 höher. Nach 50a erhöht sich dieser Faktor sogar auf 7,7. Der ursprünglich dominierende Beitrag von Cäsium nach mehreren Jahren Bestrahlung wird damit reduziert. Während früher das Verhältnis von Cäsium zu Jod nach 50a 24,6 betrug, erreicht es nun gerade noch 2,3.

Verantwortlich für diese Umschichtung ist die Wahl der trockenen Ablagerungsgeschwindigkeit. Im Gegensatz zur früheren Annahme einer für Jod und Cäsium gleich großen Ablagerungsgeschwindigkeit wird jetzt für Aerosole und damit auch für Cäsium ein um das Zehnfache geringerer Wert gewählt (s. Abschnitt 2.1.3).

#### 3.4 Zeitabhängiger Verlauf der potentiellen Inhalationsdosis

Während des Durchzugs der Aktivitätsfahne sind die in ihrem Bereich lebenden Personen der Inhalation kontaminierter Luft ausgesetzt. Die Durchzugszeit der Fahne und damit die Inhalationszeit sind etwa gleich der Dauer der Freisetzung. Die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität verursacht im Körper eine interne Bestrahlung, deren Dauer von der Halbwertszeit sowie der Verweilzeit des jeweiligen Nuklids im Körper abhängt.

In den Abbildungen 7 bis 11 ist die Inhalationsdosis für die Organe Knochenmark, Knochenoberfläche, Lunge und Schilddrüse sowie den Ganzkörper nach den wichtigsten Nukliden aufgeschlüsselt. Zugrundegelegt ist wiederum der Wetterablauf "neutral". Der Aufpunkt für die Ortsdosis befindet sich in 10 km Entfernung unter der Fahnenachse. Dargestellt ist die Dosis, die innerhalb von fünf bzw. vier Zeitabschnitten im Körper akkumuliert wird. Der Nullpunkt der Zeitskala ist dabei der Beginn der Inhalation der kontaminierten Luft der durchziehenden Aktivitätsfahne. In Abbildung 7 ist am linken Bildrand die für Frühschäden relevante Kurzzeit-Knochenmarksdosis  $D_{KM}$  abzulesen. Diese Dosis wird ermittelt durch Integration über die ersten 30 Tage nach der Inhalation, wobei die im Zeitraum vom 8. bis zum 30. Tag akkumulierte Dosis nur zur Hälfte berücksichtigt wird.

Zu allen Zeiten und für alle dargestellten Organe sind nur die folgenden zehn Nuklide für die Gesamtdosis von Bedeutung: Cs-134, Cs-137, Te-132, J-131, J-133, J-135, Ba-140, Ru-106, Sr-89 und Sr-90. Ein Vergleich der Abbildungen 7 bis 11 mit den Bildern F8-8-7(1) bis 8-7(5) aus /2/ zeigt den Rückgang des Beitrags der Transurane an der Gesamtdosis. Der Grund dafür ist wiederum die um den Faktor 10 verringerte trockene Ablagerungsgeschwindigkeit für Aerosole.

### 3.5 Potentielle Dosis durch die mit der Atemluft inkorporierte Aktivität infolge Resuspension

Gemittelt über alle Freisetzungskategorien zeigt dieser Belastungspfad einen relativen Beitrag von nur etwa 3,5 % zu den Spätschäden, für die FK2 allein sogar von nur 2,7 %. Dennoch soll aus Gründen der Vollständigkeit auch für diesen Belastungspfad eine nuklidspezifische Darstellung der Dosis einzelner Organe gezeigt werden.

Der Zeitraum, in dem eine Inhalation resuspendierter Aktivität erfolgt, ist hier mit zehn Jahren angenommen. Für die Organe Ganzkörper, Knochenmark, Lunge und Knochenoberfläche ist in Abb. 12 eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Folgedosis (dose commitment) über 50 Jahre dargestellt.

Bei den aufgeführten Organen tragen die folgenden Nuklide mit über 90 % zur Gesamtdosis bei: Sr-90, Ru-106, Cs-137, Pu-238, Pu-240, Pu-241, Cm-242 und Cm-244.

### 3.6 Potentielle Dosis durch Ingestion

Die Berechnung der internen Bestrahlung durch die mit den Nahrungsmitteln inkorporierte Aktivität erfolgt nach dem einfachen Ingestionsmodell der amerikanischen Reaktorsicherheitsstudie /4/. Es werden nur die Radionuklide Sr-89, Sr-95, J-131, J-133, Cs-134, Cs-136, Cs-137 sowie zusätzlich die Transurane Pu, Am und Cm berücksichtigt (s. Abschnitt 2.2.2). Dabei wird unterschieden zwischen vier Expositionspfaden:

- 1) Konsum von Milch, direkte Ablagerung auf Gras und Weidepflanzen (nur bei der ersten Ernte wirksam)
- 2) Konsum von Milch, Aufnahme über die Wurzel
- 3) Konsum von anderen landwirtschaftlichen Produkten, direkte Ablagerung auf Pflanzen (nur bei der ersten Ernte wirksam)
- 4) Konsum von anderen landwirtschaftlichen Produkten, Aufnahme über die Wurzel.

Dargestellt wird in Abb. 13 bzw. Abb. 14 die nuklidspezifische Aufschlüsselung der Pfade 1 bzw. 3. Die Gesamtdosis der Pfade 2 bzw. 4 ist um mehr als eine Zehnerpotenz geringer als die der Pfade 3 bzw. 4. Die Folgedosis über 50 a nach Ingestion von Milch (Abb. 13) rührt zu über 50 % von nur drei Nukliden - Cs-134, Cs-137 und J-131 - her. Beim Organ Knochenmark ist J-131 durch Sr-90 ersetzt.

Die Dosis, die durch den Verzehr anderer landwirtschaftlicher Produkte herührt, wird zu über 90 % von nur zwei Nukliden - Cs-134 und Cs-137 - verursacht.

#### 4. Probabilistische Ergebnisse

##### 4.1 Darstellungsformen

Die Darstellung der Rechenergebnisse erfolgt wie in der DRS graphisch in Form von komplementären Häufigkeitsverteilungen<sup>1)</sup> der Kollektivschäden KS und Kollektivdosen KD sowie der von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen F und Personen P.

Die komplementäre Häufigkeitsverteilung einer Größe S (z. B. Kollektivschaden) gibt die Häufigkeit an, mit der der Wert S erreicht oder überschritten wird. Sie wird u. a. graphisch als Funktion in einem doppellogarithmischen Achsenkreuz dargestellt. Daneben werden in Tabellenform die charakteristischen Parameter dieser Verteilung, wie Mittelwert  $\bar{S}$ , minimaler Wert  $S_{\min}$ , 50 % Perzentilwert (Medianwert)  $S_{50\%}$ , 95 % Perzentilwert  $S_{95\%}$ , 99 % Perzentilwert  $S_{99\%}$  und maximaler Wert  $S_{\max}$ , ausgewiesen.

Neben den Häufigkeitsverteilungen werden die jährlichen Erwartungswerte der einzelnen Unfallfolgen KS, KD, F und P bestimmt. Diese Erwartungswerte errechnen sich durch Multiplikation der Einzelgrößen mit ihren Eintrittshäufigkeiten. Sie werden für Individuen (mittleres Individualrisiko<sup>2)</sup>) graphisch in Abhängigkeit von der Entfernung dargestellt und für die insgesamt betroffenen Personen (mittleres Kollektivrisiko<sup>3)</sup>) in Tabellenform angegeben.

---

1) Im englischen Sprachraum bezeichnet mit CCFD = Complementary Cumulative Frequency Distribution

2) Das mittlere Individualrisiko (Erwartungswert für den Individualschaden) gibt den pro Reaktorbetriebsjahr im Mittel auftretenden Individualschaden an.

3) Das mittlere Kollektivrisiko gibt den beim Betrieb von 25 Reaktorblöcken pro Jahr im Mittel auftretenden Kollektivschaden an.

Entsprechend dem Konzept der effektiven Schadensfaktoren /21/ werden in der für die vorliegenden Risikoabschätzungen verwendeten Version UFOMOD/B3 des Rechenprogramms die Spätschäden für die zum Zeitpunkt der Freisetzung lebenden Generationen (LG) und die folgenden Generationen (FG) getrennt berechnet. In der Ergebnisdarstellung werden die Kollektivschäden und Kollektivrisiken wegen der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der DRS zusätzlich für alle Generationen gemeinsam ( $AG = LG + FG$ ) ausgewiesen.

#### 4.2 Kollektivschäden und ihre Häufigkeitsverteilungen

##### 4.2.1 Frühschäden

Nach der Dosis-Wirkungs-Beziehung der DRS /1, 2/ können Frühschäden erst oberhalb einer Schwellendosis von 100 rad Knochenmarksdosis ( $LD_{50} = 510$  rad) auftreten. Die komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen der berechneten Kollektivschäden sind aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien in Abb. 15 dargestellt. In der Tabelle 4 sind die charakteristischen Größen dieser Häufigkeitsverteilungen wiedergegeben (dabei sind die zugehörigen Eintrittshäufigkeiten nicht aufgeführt!). Der kleinste und der größte Kollektivschaden resultieren - wie alle Einzelergebnisse - jeweils aus einer von  $115 \cdot 36 \cdot 19 = 78660$  betrachteten Unfallfolgesituationen.

Wie in der DRS werden Frühschäden bei den Freisetzungskategorien FK1 bis FK4 berechnet. Die höchsten Schäden ergeben sich weiterhin bei der FK1, allerdings liegen der Schadensumfang und auch die Schadenswahrscheinlichkeit deutlich niedriger als in der DRS. So wird bei der FK1 jetzt nur noch in 1,7 % der Unfallfolgesituation überhaupt ein Frühschaden  $\geq 1$  berechnet (s. Tabelle 5) und der mittlere Kollektivschaden liegt um das 10-fache unterhalb des Wertes der DRS. Bei der FK2 reduziert sich der Schadensumfang im Mittel nur um den Faktor 1.3, bei den anderen Freisetzungskategorien werden leicht höhere Ergebnisse als in der DRS erhalten.

Die Erklärung für diese Änderungen folgt aus der Tatsache, daß bei der FK1 der Expositionspfad "Bodenstrahlung" nahezu ausschließlich Ursache der Frühschäden ist (s. Tabelle 6). Bei FK2 trägt er mit weniger als der Hälfte zu den Frühschäden bei, während bei FK3 und FK4 die Wolkenstrahlung und die Inhalation als Hauptexpositionspfade dominieren. Aufgrund der reduzierten Ablagerungsgeschwindigkeiten und Washout-Koeffizienten (s. Abschnitt 2.1.3) wird die Bodenstrahlung und damit die fröhschadensrelevante Knochenmarksdosis hauptsächlich bei der FK1, in geringerem Ausmaß bei der FK2 abgeschwächt. Der leichte Anstieg im Schadensumfang bei FK3 und FK4 ist auf die veränderten Dosisfaktoren (s. Abschnitt 2.2.1) zurückzuführen.

#### 4.2.2 Spätschäden

Somatische Strahlenspätschäden werden auf der Grundlage einer linearen Dosis-Risiko-Beziehung ohne Schwellenwert berechnet /1, 2/. Nach dieser Annahme können sie deshalb bei allen Dosiswerten hervorgerufen werden. Die komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen der ermittelten Kollektivschäden sind aufgeschlüsselt nach Freisetzungskategorien in den Abb. 16 a - c dargestellt. In den Tabellen 7 a - c sind die zugehörigen charakteristischen Größen wiedergegeben (ebenfalls ohne die zugehörigen Eintrittshäufigkeiten).

Der Vergleich mit der DRS zeigt, daß quantitativ nahezu die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Bezüglich ihrer Interpretation gelten ebenfalls ähnliche Aussagen, wie sie in der DRS formuliert sind, einige Tendenzen haben sich allerdings noch verstärkt.

Als Zusatzinformation zum Auftreten der Spätschäden ist für die Freisetzungskategorien FK1 bis FK7 in den Tabellen 8a - h die relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten zusammengestellt. Bei allen Freisetzungskategorien ist die Bedeutung der Bodenstrahlung deutlich zurückgegangen, wogegen der Ingestionspfad zum dominierenden Expositionspfad angewachsen ist. So zeigt der Vergleich mit /25/, daß z. B.



bei den Kategorien FK1, FK2 und FK7 die Bedeutung der Bodenstrahlung von insgesamt 36,5 %, 50,8 % und 29,3 % auf 21,3 %, 28,4 % und 18,7 % zurückging, während die Ingestion von 43,5 %, 38,2 % und 69,7 % auf 62,0 %, 60,5 % und 79,9 % anstieg. Diese generelle Zunahme der Bedeutung des Ingestionspfades bei gleichzeitigem Rückgang der Bodenstrahlung ist auf die neuen, kleineren Ablagerungsgeschwindigkeiten zurückzuführen. Dadurch wird die freigesetzte Aktivität in geringerem Umfang auf der Bodenoberfläche niederschlagen und damit weiträumiger zu sehr großen Entfernungen transportiert. Tab. 9 zeigt, welcher Anteil der Spätschäden noch jenseits von 540 km Entfernung vom Ort der Freisetzung berechnet wird. In dieser Entfernung enden im Unfallfolgenmodell die Ausbreitungsrechnungen sowie sämtliche Schutz- und Gegenmaßnahmen /2/. Bei den FK4 bis FK7 liegt dieser Anteil jetzt bei etwa einem Drittel (DRS: zwischen 11,5 und 25 % /25/). Bei den FK1 bis FK3 ist er von 49,3 %, 36,4 % bzw. 22,5 % auf 71,0 %, 65,2 % bzw. 48,4 % angewachsen. In diesen großen Entfernungen treten naturgemäß nur noch sehr kleine Strahlendosen auf. Der Tabelle 10 ist zu entnehmen, zu welchem Prozentsatz die Spätschäden aufgrund von Strahlendosen ermittelt werden, die oberhalb der Grenzwerte für Störfälle (Strahlenschutzverordnung §28 (3)) liegen. Im Mittel werden je nach Freisetzungskategorie zwischen rd. 80 % und 100 % der aufgrund der linearen Dosis-Risiko-Beziehung ermittelten Spätschäden unterhalb dieser Dosiswerte berechnet. Die Prozentzahlen liegen für die einzelnen Kategorien höher, als es die Analyse der DRS-Ergebnisse /25/ zeigt.

Die erhöhte Bedeutung des Ingestionspfades bei gleichzeitigem Rückgang der durch Bodenstrahlung verursachten Spätschäden und die nur geringfügige Reduktion des Schadensumfangs der Unfallfolgen erklärt sich hauptsächlich aus drei Effekten:

- a) Im Entfernungsbereich bis 540 km werden wegen der reduzierten Deposition Schutz- und Gegenmaßnahmen in deutlich geringerem Umfang ergriffen (s. Abschnitt 4.3). Dies trifft insbesondere auch für die sich an sehr niedrigen Dosiskriterien orientierenden "Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte" zu. Dadurch steigt erheblich die Anzahl von Personen, die mit sehr kleinen Dosen unterhalb dieser Grenzwerte strahlenexponiert werden.

- b) Wie schon die Analyse der in der DRS berechneten Spätschäden zeigt /25/, werden durch die Rechengrenze bei 540 km die Gegenmaßnahmen "Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte" in ihrer räumlichen Ausdehnung begrenzt. Dadurch werden jenseits von 540 km Spätschäden hauptsächlich über den Ingestionspfad aufgrund kleiner Strahlendosen berechnet. Diese Modelleigenschaft bewirkt aufgrund des in UFOMOD/B3 noch weitreichenderen Transports von Radionukliden verstärkt eine großflächige Deposition mit niedrigsten Aktivitätskonzentrationen, die vor allem über die Inkorporation durch Verzehr landwirtschaftlicher Produkte zu kleinsten Strahlendosen bei einer großen Zahl von Personen führt. Wegen der linearen Dosis-Risiko-Beziehung erhöht sich somit der Anteil von Spätschäden, die jenseits von 540 km Entfernung berechnet werden.
- c) Der Anteil der Spätschäden, die sich über den Expositionspfad "Inhalation von in die Atemluft resuspendierte Bodenaktivität" berechnen, ist aufgrund des an humide Klimazonen angepaßten Resuspensionsmodells (s. Abschnitt 2.1.4) von im Mittel 6,2 % (DRS, /25/) auf 0,6 % (s. Tabellen 8 a - h zurückgegangen. Damit direkt verknüpft ist eine Abnahme der Spätschäden in der Größenordnung von einigen Prozenten.

Diese Ergebnisse zeigen erneut, daß - wie auch schon in der DRS dargestellt - die Anzahl der somatischen Spätschäden bei Anwendung einer linearen Dosis-Risiko-Beziehung weniger durch die unterschiedlichen Unfallfolgsituationen bestimmt wird, sondern vielmehr abhängt von der insgesamt abgelagerten Aktivität, die im wesentlichen proportional ist zur freigesetzten Menge.

#### 4.2.3 Genetische Belastung

Die genetische Belastung wird wie in der DRS durch die genetisch signifikante Kollektivdosis KD angegeben. Die komplementären Häufigkeitsverteilungen der Kollektivdosen zeigt die Abb. 17, die zugehörigen charakteristischen Größen sind in der Tabelle 11 wiedergegeben.

Bezüglich der Ergebnisse und ihrer Interpretation gelten die gleichen Aussagen, wie bei den Spätschäden. Auch die genetisch signifikante Kollektivdosis errechnet sich überwiegend aus kleinen Strahlendosen, denen weiträumig eine große Bevölkerungszahl ausgesetzt ist. Bei den einzelnen Freisetzungskategorien liegt der Beitrag von Strahlendosen unterhalb der Grenzdosis für Störfälle (5 rem, § 28(3) StrlSchV) zur Kollektivdosis zwischen 90 % und 99,5 %. Die Ausschlüsselung der genetisch signifikanten Kollektivdosis nach den beitragenden Expositionspfaden ist Tab. 12 zu entnehmen.

#### 4.3 Von Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffene Flächen und Personen

Das Modell der Schutz- und Gegenmaßnahmen der DRS definiert aufgrund geometrischer Bedingungen und Isodosislينien Gebiete im Umkreis der betrachteten Standorte, innerhalb denen sowohl in ihrer zeitlichen Abfolge als auch in ihrem Umfang unterschiedliche Gegenmaßnahmen durchgeführt werden.

Insbesondere werden dabei die Gebiete definiert, in denen die Maßnahmen

- Evakuierung (Gebiet A)
- Schnelle Umsiedlung (Gebiet B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub>)
- Umsiedlung (Gebiet C)
- Dekontamination (Gebiet D<sub>1</sub>)
- Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte

ablaufen.

Das Gebiet A wird bei jeder Freisetzung unabhängig von Dosiskriterien evakuiert. Es umfaßt eine Fläche von 33,3 km<sup>2</sup>, die Anzahl der betroffenen Personen liegt je nach Windrichtung und Standort wie in der DRS zwischen 0 und 40 100, im Mittel bei 6 300. Die komplementäre Häufigkeitsverteilungen der von der Evakuierung betroffenen Flächen und Personen sind der Vollständigkeit halber in Abb. 20 und 21 dargestellt.

Das Dosiskriterium für "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet B<sub>1</sub> + B<sub>2</sub>) (potentielle Knochenmarksdosis durch externe Strahlung vom Boden innerhalb von 7 Tagen  $\geq$  100 rem) wird - wie in der DRS - nur bei den Freisetzungskategorien FK1 bis FK3 überschritten. Die komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen der von der Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" betroffenen Flächen und Personen zeigen die Abb. 20 und 21, die zugehörigen charakteristischen Größen sind in den Tab. 13 und 14 dargestellt. Wegen der gegenüber der DRS reduzierten Deposition ergeben sich kleine Flächen und Personenzahlen.

"Umsiedlung" der Bevölkerung (Gebiet C) erfolgt nach dem Schutz- und Gegenmaßnahmenmodell aufgrund des Dosiskriteriums "potentielle Ganzkörperdosis durch externe Bodenstrahlung innerhalb von 30 a  $\geq$  250 rem". Dieses Kriterium wird - wie in der DRS - bei den Freisetzungskategorien FK1 bis FK7 überschritten. Allerdings berechnen sich auch hier mit UFOMOD/B3 kleinere Flächen und Personenzahlen als in der DRS angegeben. Die komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen der betroffenen Flächen und Personen sind in den Abb. 22 und 23, die zugehörigen charakteristischen Größen in Tabelle 15 und 16 dargestellt.

Falls die Bodenstrahlung zu einer Ganzkörperdosis zwischen 25 rem und 250 rem in 30 Jahren führt, wird im Schutz- und Gegenmaßnahmenmodell angenommen, daß nach Dekontamination mit einem maximalen Dekontaminationsfaktor  $DF_{\max} = 10$  die Dosis von 25 rem im ganzen Gebiet nicht überschritten wird. Die häufigkeitsbewertete Ausweisung der zu dekontaminierenden Flächen war in der DRS nicht vorgesehen und ist auch mit Hilfe des Rechenprogramms UFOMOD/B3 nicht möglich. Da jedoch in /6/ mit Hilfe einer ergänzenden Auswertung von Zwischenergebnissen die von dieser Maßnahme betroffenen mittleren Flächen berechnet und ausgewiesen wurden, wird aus Gründen der Vergleichbarkeit diese Zusatzinformation auch für die Freisetzungskategorien FK1 bis FK8 angegeben (s. Tabelle 17). Danach kommt es - außer bei FK8 - bei allen Freisetzungskategorien zur Ausbildung eines Gebiets D1.

Die Kontamination landwirtschaftlicher Produkte wird hauptsächlich verursacht durch die direkte Ablagerung der radioaktiven Stoffe auf oberirdischen Teilen von Pflanzen (Belastung der Bevölkerung im ersten Jahr) oder indirekt über den Weg Boden - Wurzel - Pflanze (Belastung in den Folgejahren). Kontaminierte Pflanzen wiederum können unmittelbar Bestandteil der menschlichen Nahrung sein oder zur Kontamination tierischer Produkte führen. Besondere Bedeutung hat dabei der Weide-Kuh-Milch-Pfad.

In der DRS wurden bezüglich der Gegenmaßnahmen für die genannten Pfade und Zeiträume die Dosiskriterien der amerikanischen "Reactor Safety Study" übernommen. Wenn eines oder mehrere Kriterien überschritten werden, wird angenommen, daß die zugehörigen Belastungspfade während des betreffenden Zeitraums durch Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte unterbrochen sind. Wie folgende Tabelle zeigt, basieren diese Dosiskriterien auf der Belastung des Ganzkörpers, des Knochenmarks und der Schilddrüse.

Organ	Verzehr von Milch	Verzehr anderer landw. Produkte
Ganzkörper	3,3 rem/50 a	2 rem/50 a
Knochenmark	3,3 rem/50 a	2 rem/50 a
Schilddrüse	10 rem/50 a	-

Die Berechnung der von den Gegenmaßnahmen "Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte" betroffenen Flächen erfolgte in Erweiterung der Ergebnisse der DRS und zum Vergleich mit /6/ durch zusätzliche Auswertung der Unfallfolgenrechnungen. In Tabelle 17 sind die mittleren Flächen für die einzelnen Freisetzungskategorien dargestellt. Danach kommt es - außer bei FK8 - bei allen Freisetzungskategorien zur Ausbildung von Gebieten, in denen nach dem Rechenmodell Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte erfolgen müßten.

An dieser Stelle muß allerdings darauf hingewiesen werden (wie auch schon in der DRS /2/), daß sämtliche Ergebnisse, die aufgrund der Modellierung des Ingestionspfades ermittelt werden, nur als erste Abschätzungen zu werten sind, da noch das amerikanische Modell /4/ unverändert verwendet wird. In diesem sehr vereinfachten Modell sind noch die Zahlenwerte der amerikanischen Studie bezüglich Verzehrgeohnheiten und Transferfaktoren enthalten. Eine Neumodellierung aller im Zusammenhang mit der Ingestion relevanten Rechenmodelle ist im Rahmen der Phase B der DRS vorgesehen.

#### 4.4 Entfernungsabhängige Individualrisiken

Für Personen, die sich in einer bestimmten Entfernung vom Ort der möglichen Freisetzung befinden, resultiert aus der unfallbedingten Strahlenbelastung eine gewisse Wahrscheinlichkeit, einen somatischen Früh- oder Spätschaden zu erleiden. Diese Wahrscheinlichkeit, multipliziert mit der Eintrittshäufigkeit der Freisetzung ergibt die individuelle Schadenseintrittshäufigkeit, deren Mittelwert aus allen Unfallfolgesituationen auch als mittleres Individualrisiko bezeichnet wird. Dieses Individualrisiko ist in Abb. 24 und 25 a, b für die zum Zeitpunkt der Freisetzung lebenden Generationen (LG) und die folgenden Generationen (FG) dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse der DRS sind in /2/ für alle Generationen (AG = LG + FG) sowie aufgeschlüsselt nach LG und FG in /25/ veröffentlicht.

#### 4.5 Kollektivrisiken und Erwartungswerte der von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen

Neben den in den vorangegangenen Abschnitten dargesellten komplementären Häufigkeitsverteilungen der Unfallfolgen ist die multiplikative Verknüpfung von Schadensumfang und Eintrittshäufigkeit und damit die Berechnung der Kollektivrisiken von Interesse. Die Vorgehensweise ist die gleiche wie in der DRS. Tabelle 18 zeigt die Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und die Erwartungswerte der Kollektivdosen.

Da die Freisetzungsdaten, insbesondere die Freisetzungshäufigkeiten, gegenüber der DRS unverändert geblieben sind, ändern sich die Kollektivrisiken wie die mittleren Kollektivschäden (s. Tabellen 4 und 7 a - c). Das gesamte Kollektivrisiko für Frühschäden liegt mit  $1,4 \cdot 10^{-4}/a$  um den Faktor 3,5 niedriger als in der DRS. Den höchsten Beitrag hierzu liefert jetzt die FK2 (DRS: FK1).

Das Kollektivrisiko für Spätschäden hat sich mit  $7,4 a^{-1}$  nur geringfügig um 20 % gegenüber der DRS reduziert, was nahezu ausschließlich auf den Rückgang des mittleren Kollektivschadens bei der FK7 zurückzuführen ist, die auch weiterhin den dominierenden Beitrag zum Kollektivrisiko liefert (52,7 %). Der Erwartungswert der genetisch signifikanten Kollektivdosis liegt mit  $5,0 \cdot 10^4$  manrem um etwa 10 % unterhalb des Wertes in der DRS.

Die Erwartungswerte der von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen sind in Tabelle 19 angegeben. Die Änderung der Zahlenwerte gegenüber der DRS sind in Tabelle 20 aufgeführt.

## 5. Zusammenfassung, Ausblick

Zur Abschätzung des mit dem Betrieb von 25 Kernkraftwerken an 19 Standorten in der Bundesrepublik Deutschland verbundenen Risikos aufgrund von Unfällen mit größeren Radionuklidfreisetzungen wurde die modifizierte Version UFOMOD/B3 des Unfallfolgenmodells der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke (DRS)" eingesetzt. In dieser Version wurden neuere wissenschaftliche Erkenntnisse hinsichtlich der atmosphärischen Ablagerungs- und Auswaschvorgänge, des Resuspensionsprozesses und der Dosisermittlung berücksichtigt. Die Rechnungen basieren auf den unveränderten Freisetzungskategorien der DRS Phase A.

Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zur DRS eine deutliche Reduktion des Risikos für akute Todesfälle (Frühschäden) um im Mittel den Faktor 3,6. Dies ist vor allem auf die verringerte Ablagerung zurückzuführen, so daß die freigesetzte Aktivität in größere Entfernungen transportiert wird. Als Folge resultieren - insbesondere im Nahbereich - kleinere Strahlendosen; aber auch in größeren Entfernungen sind die auf der Bodenoberfläche berechneten Aktivitätskonzentrationen geringer, so daß die von Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen erheblich reduziert werden.

Wegen des weiteren Transports der freigesetzten Aktivität wird ein erheblich größerer Anteil jenseits der Rechengrenze von 540 km abgelagert. Jenseits dieser Entfernung enden im derzeitigen Modell die atmosphärischen Ausbreitungsrechnungen sowie alle Schutz- und Gegenmaßnahmen, und es wird angenommen, daß die Restaktivität gleich verteilt in einem Kreisring bis 2500 km Entfernung mit einer mittleren Bevölkerungsdichte von 25 Einw./km<sup>2</sup> abgelagert wird. Aufgrund dieser Modelleigenschaft erhöht sich die Anzahl der jenseits von 540 km Entfernung berechneten stochastischen somatischen Schäden (Spätschäden) auf im Mittel bis zu 71 % (FK1). Insgesamt verändert sich das Spätschadenrisiko um -20 %.



Das modifizierte Unfallfolgenmodell UFOMOD/B3 wurde hauptsächlich wegen der Notwendigkeit standortspezifischer Risikoabschätzungen für andere Reaktortypen (HTR-1160, SNR 300) entwickelt, da die im Rahmen der Phase B der DRS vorgesehenen Verbesserungen aus Termingründen nicht abgewartet werden konnten. Die durchgeführten Modifikationen sind als ein erster Schritt im Hinblick auf ein Unfallfolgenmodell zu werten, das auf dem neuesten Stand wissenschaftlicher Kenntnisse basiert. Vor allem sind Veränderungen in den Teilmodellen der atmosphärischen Ausbreitung, Ingestion, Schadensberechnung sowie Schutz- und Gegenmaßnahmen zu erwarten. Erhebliche Bedeutung wird auch der Wahl geeigneter Darstellungsformen von Teil- und Endergebnissen zukommen, um ausführlich die Interpretation und Analyse der Risikoabschätzungen zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- /1/ Der Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.)  
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke  
Verlag TÜV-Rheinland, Köln, 1979
- /2/ siehe /1/  
Fachband 8: Unfallfolgenrechnungen und Risikoergebnisse  
Verlag TÜV-Rheinland, Köln, 1981
- /3/ M. Schückler, S. Vogt  
UFOMOD - Programm zur Berechnung der radiologischen Folgen von  
Reaktorunfällen im Rahmen von Risikostudien  
Bericht KfK-3092 (1981)
- /4/ US Nuclear Regulatory Commission (Ed.)  
Reactor Safety Study  
Report WASH-1400 (1975)
- /5/ J. Ehrhardt, A. Bayer, W. Kröger, K. Schwarzer  
Unfallfolgen- und Risikoabschätzungen im Anschluß an die proba-  
bilistische Sicherheitsstudie für ein Kernkraftwerk mit einem HTR  
großer Leistung (HTR-1150)  
Bericht KfK-3382, Jül-Spez-157, Spetember 1982
- /6/ A. Bayer, J. Ehrhardt  
Unfallfolgenrechnungen und Risikoabschätzungen im Rahmen der "Risi-  
koorientierten Analyse zum SNR 300"  
Bericht KfK-3423 (1983)
- /7/ S. Vogt, P. Wittek  
Untersuchungen des Einflusses geänderter Parameter im Teilmodell  
atmosphärischer Ausbreitung auf die Ergebnisse der Deutschen  
Risikostudie Kernkraftwerke (DRS)  
Bericht KfK-3209 (1982)

- /8/ D. C. Aldrich, A. Bayer, M. Schückler  
A Proposed Windshift Model for the German Reactor Safety Study  
Bericht KfK-2791 (1979)
- /9/ W. Hübschmann, S. Vogt, KfK-Karlsruhe  
private Mitteilung (1982)
- /10/ R. Jonas, K. J. Vogt  
Untersuchungen zur Ermittlung der Ablagerungsgeschwindigkeit  
von Aerosolen auf Vegetation und andere Probenahmeflächen  
Bericht Jül-1780 (1982)
- /11/ G. N. Kelly, R. H. Clarke  
An Assessment of the Radiological Consequences of Releases from  
Degraded Core Accidents for the "Sizewell PWR",  
Report NRPB-R137 (1982)
- /12/ Brenk, H. D., Vogt, K. J.  
The Calculation of Wet Deposition from Radioactive Plumes  
Nuclear Safety 22, 362-370 (1981)
- /13/ Schrödl, E., Urban, H.  
Literaturstudie zum Kurzzeit-Washout-Faktor von Aerosolen  
GRS-Bericht A-609, (1981)
- /14/ Cohen, B. L.  
Hazards from Plutonium Toxicity  
Health Physics, 32, 359-379, (1977)
- /15/ Linsley, G. S.  
Resuspension of the Transuranium Elements - A Review of  
Existing Data  
Report NRPB-R75 (1978)

/16/ Kocher, D. C.

Potential Importance of Resuspension During Chronic Releases  
of Radionuclides to the Atmosphere  
Health Physics, 39, 687-690 (1980)

/17/ Liquid Metal Fast Breeder Reactor Program, Vol. II Proposed  
Final Environmental Statement  
Report WASH-1535 (1974)

/18/ ICRP Publication No. 30, Part 1  
Limits for Intakes of Radionuclides by Workers  
Annals of the ICRP, Vol, 2, No1 2, 1979

ICRP Publication No. 30, Supplement To Part 1  
Limits for Intakes of Radionuclides by Workers  
Annals of the IRRP, Vol. 3, No. 1 - 4, 1979

ICRP Publication No. 30, Part 3  
Limits for Intakes of Radionuclides by Workers  
Annals of the ICRP, Vol. 6, No. 2/3, 1981

/19/ Clarke, R. H., Kelly, G. N.

MARC - The NRPB Methodology for Assessing Radiological Conse-  
quences of Accidental Releases of Activity  
Report NRPB-R127 (1981)

/20/ Charles, D., Crick, M. J., Fell, T. P., Greenhalgh, J. R.

DOSE-MARC: The dosimetric module in the methodology for assessing  
the radiological consequences of accidental releases  
Report NRPB (to be published)

/21/ Bayer, A., Ehrhardt, J., Schückler, M.

Das Konzept der effektiven Schadensfaktoren zur Ermittlung stochastischer somatischer Schäden nach unfallbedingten Strahlenexpositionen

Bericht KfK-3037 (1980)

/22/ Ehrhardt, J.

Dokumentation der Datensätze im Dosismodell des Rechenprogramms UFOMOD/B3

Bericht KfK-3390 (1982)

/23/ Kocher, D. C.

Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to Photon and Electron Radiation from Radionuclides Occuring in Routine Releases from Nuclear Fuel Cycle Facilities

Health Physics 38, (1980) 543-621 (1980)

/24/ Schwarz, G., Bastek, JH.

Untersuchungen zum Transport und zur Verteilung von Transuranen in terrestrischen Nahrungsketten

Interner BSU-Bericht 8109/1, April 1982

/25/ J. Ehrhardt

Analyse der in der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" berechneten stochastischen somatischen Schäden

Bericht KfK-3218 (1981)

Nuklid	Halbwertszeit (Tage)	Kerninventar (Curie)
Co-58	7,1 E + 01	1,27 E + 06
Co-60	1,9 E + 03	9,63 E + 05
Kr-85m	1,8 E - 01	2,70 E + 07
Kr-85	3,9 E + 03	7,92 E + 05
Rb-86	1,9 E + 01	3,73 E + 04
Kr-87	5,3 E - 02	5,26 E + 07
Kr-88	1,2 E - 01	7,64 E + 07
Sr-89	5,2 E + 01	1,05 E + 08
Sr-90	1,1 E + 04	5,30 E + 06
Y-90	2,7 E + 00	5,72 E + 06
Sr-91	4,0 E - 01	1,28 E + 08
Y-91	5,9 E + 01	1,33 E + 08
Zr-95	6,5 E + 01	1,78 E + 08
Nb-95	3,5 E + 01	1,76 E + 08
Zr-97	7,1 E - 01	1,76 E + 08
Mo-99	2,8 E + 00	1,91 E + 08
Tc-99m	2,5 E - 01	1,66 E + 08
Ru-103	3,9 E + 01	1,37 E + 08
Ru-105	1,8 E - 01	9,79 E + 07
Rh-105	1,5 E + 00	6,59 E + 07
Ru-106	3,7 E + 02	3,96 E + 07
Sb-127	3,9 E + 00	7,93 E + 06
Te-127m	1,1 E + 02	1,51 E + 06
Te-127	3,9 E - 01	7,68 E + 06
Sb-129	1,8 E - 01	4,13 E + 07
Te-129m	3,4 E + 01	6,58 E + 06
Te-129	4,8 E - 02	3,91 E + 07
Te-131m	1,2 E + 00	1,56 E + 07
J-131	8,0 E + 00	1,04 E + 08
Te-132	3,2 E + 00	1,45 E + 08
J-132	9,6 E - 02	1,50 E + 08
J-133	8,7 E - 01	2,02 E + 08
Xe-133	5,3 E + 00	1,99 E + 08
J-134	3,7 E - 02	2,32 E + 08
Cs-134	7,5 E + 02	1,38 E + 07
J-135	2,8 E - 01	1,81 E + 08
Xe-135	3,8 E - 01	4,07 E + 07
Cs-136	1,3 E + 01	4,51 E + 06
Cs-137	1,1 E + 04	7,06 E + 06
Ba-140	1,3 E + 01	1,86 E + 08
La-140	1,7 E + 00	1,93 E + 08
Ce-141	3,2 E + 01	1,80 E + 08
Ce-143	1,4 E + 00	1,59 E + 08
Pr-143	1,4 E + 01	1,55 E + 08
Ce-144	2,8 E + 02	1,09 E + 08
Nd-147	1,1 E + 01	7,32 E + 07
Np-239	2,3 E + 00	2,14 E + 09
Pu-238	3,2 E + 04	1,27 E + 05
Pu-239	8,9 E + 06	2,89 E + 04
Pu-240	2,4 E + 06	3,22 E + 04
Pu-241	5,3 E + 03	6,04 E + 06
Am-241	1,5 E + 05	3,54 E + 03
Cm-242	1,6 E + 02	1,42 E + 06
Cm-244	6,6 E + 03	1,15 E + 05

Kerninventar - Abbrand: 10 000, 19 600, 33 500 MWd/t Uran

Tab. 1 Nukliddaten und Kerninventar zum Zeitpunkt des Unfalleintritts /2/

Freisetzungskategorie (FK) Nr.	Beschreibung	Zeitpunkt der Freisetzung h	Dauer der Freisetzung h	Höhe der Freisetzung m	Freigesetzte Energie 10 <sup>6</sup> kJ/h	Häufigkeit der Freisetzung 1/a	Freigesetzter Anteil des Kerninventars							
							Xe-Kr	J <sub>org</sub>	J <sub>2</sub> -Br	Cs-Rb	Te-Sb	Ba-Sr	Ru <sup>2)</sup>	La <sup>3)</sup>
1	Kernschmelzen mit Dampfexplosion	1	1	30	540	2·10 <sup>-6</sup>	1.0	7.0·10 <sup>-3</sup>	7.9·10 <sup>-1</sup>	5.0·10 <sup>-1</sup>	3.5·10 <sup>-1</sup>	6.7·10 <sup>-2</sup>	3.8·10 <sup>-1</sup>	2.6·10 <sup>-3</sup>
2	Kernschmelzen, großes Leck im Sicherheitsbehälter (Ø 300 mm)	1	3	10	15	6·10 <sup>-7</sup>	1.0	7.0·10 <sup>-3</sup>	4.0·10 <sup>-1</sup>	2.9·10 <sup>-1</sup>	1.9·10 <sup>-1</sup>	3.2·10 <sup>-2</sup>	1.7·10 <sup>-2</sup>	2.6·10 <sup>-3</sup>
3	Kernschmelzen, mittleres Leck im Sicherheitsbehälter (Ø 80 mm)	2	3	10	1	6·10 <sup>-7</sup>	1.0	7.0·10 <sup>-3</sup>	6.3·10 <sup>-2</sup>	4.4·10 <sup>-2</sup>	4.0·10 <sup>-2</sup>	4.9·10 <sup>-3</sup>	3.3·10 <sup>-3</sup>	5.2·10 <sup>-4</sup>
4	Kernschmelzen, kleines Leck im Sicherheitsbehälter (Ø 25 mm)	2	3	10	—	3·10 <sup>-6</sup>	1.0	7.0·10 <sup>-3</sup>	1.5·10 <sup>-2</sup>	5.1·10 <sup>-3</sup>	5.0·10 <sup>-3</sup>	5.7·10 <sup>-4</sup>	4.0·10 <sup>-4</sup>	6.5·10 <sup>-5</sup>
5 <sup>1)</sup>	Kernschmelzen, Oberdruckversagen, Ausfall der Störfallfilter	0	1	10	200	2·10 <sup>-5</sup>	2.0·10 <sup>-5</sup>	1.8·10 <sup>-7</sup>	1.8·10 <sup>-5</sup>	4.7·10 <sup>-5</sup>	3.6·10 <sup>-7</sup>	5.5·10 <sup>-9</sup>	—	—
		1	1	10			2.3·10 <sup>-2</sup>	1.6·10 <sup>-4</sup>	9.6·10 <sup>-4</sup>	6.7·10 <sup>-4</sup>	6.7·10 <sup>-4</sup>	8.0·10 <sup>-5</sup>	5.5·10 <sup>-5</sup>	8.8·10 <sup>-6</sup>
		25	1	10			9.8·10 <sup>-1</sup>	6.8·10 <sup>-3</sup>	9.6·10 <sup>-3</sup>	4.5·10 <sup>-4</sup>	7.7·10 <sup>-4</sup>	4.7·10 <sup>-5</sup>	5.3·10 <sup>-5</sup>	9.5·10 <sup>-6</sup>
6 <sup>1)</sup>	Kernschmelzen Oberdruckversagen	0	1	100	200	7·10 <sup>-5</sup>	2.0·10 <sup>-5</sup>	1.8·10 <sup>-9</sup>	1.8·10 <sup>-8</sup>	4.7·10 <sup>-8</sup>	3.6·10 <sup>-10</sup>	5.5·10 <sup>-12</sup>	—	—
		1	1	100			2.3·10 <sup>-2</sup>	1.6·10 <sup>-5</sup>	9.6·10 <sup>-7</sup>	6.7·10 <sup>-7</sup>	6.7·10 <sup>-7</sup>	8.0·10 <sup>-8</sup>	5.5·10 <sup>-8</sup>	8.8·10 <sup>-9</sup>
		25	1	10			9.8·10 <sup>-1</sup>	6.8·10 <sup>-3</sup>	9.6·10 <sup>-3</sup>	4.5·10 <sup>-4</sup>	7.7·10 <sup>-4</sup>	4.7·10 <sup>-5</sup>	5.3·10 <sup>-5</sup>	9.5·10 <sup>-6</sup>
7	Beherrschter Kühlmittelverluststörfall, großes Leck im Sicherheitsbehälter	0	1	10	9	1·10 <sup>-4</sup>	1.7·10 <sup>-2</sup>	3.7·10 <sup>-5</sup>	5.3·10 <sup>-3</sup>	1.3·10 <sup>-2</sup>	2.5·10 <sup>-5</sup>	2.5·10 <sup>-7</sup>	0.	0.
8	Beherrschter Kühlmittelverluststörfall	0	6	100	—	1·10 <sup>-3</sup>	4.6·10 <sup>-4</sup>	1.0·10 <sup>-8</sup>	1.2·10 <sup>-8</sup>	2.1·10 <sup>-8</sup>	4.1·10 <sup>-11</sup>	4.1·10 <sup>-13</sup>	0.	0.

<sup>1)</sup> Da die Freisetzung über einen längeren Zeitraum erfolgt, werden die freigesetzten Anteile für drei Zeitintervalle getrennt angegeben.

<sup>2)</sup> enthält Ru, Rh, Co, Mo, Tc

<sup>3)</sup> enthält Y, La, Zr, Nb, Ce, Pr, Nd, Np, Pu, Am, Cm

Tab. 2 Freisetzungsdaten /2/

Nuklid	Normierte integrale Konzentrationsfaktoren $[C_i/(C_i/m^2)]$				Summe
	Milch 1. Jahr (Kleinkinder)	andere landwirtsch. Produkte 1. Jahr (Erwachsene)	Milch Folgejahre (Kleinkinder)	andere landwirtsch. Produkte Folgejahre (Erwachsene)	
Np 239	$0.228 \cdot 10^{-3}$	$0.666 \cdot 10^{+0}$	0.0	0.0	$0.666 \cdot 10^{+0}$
Pu 238	$0.431 \cdot 10^{-3}$	$0.123 \cdot 10^{+2}$	$0.247 \cdot 10^{-4}$	$0.533 \cdot 10^{+1}$	$0.176 \cdot 10^{+2}$
Pu 239	$0.432 \cdot 10^{-3}$	$0.123 \cdot 10^{+2}$	$0.545 \cdot 10^{-4}$	$0.120 \cdot 10^{+2}$	$0.243 \cdot 10^{+2}$
Pu 240	$0.433 \cdot 10^{-3}$	$0.123 \cdot 10^{+2}$	$0.540 \cdot 10^{-4}$	$0.119 \cdot 10^{+2}$	$0.242 \cdot 10^{+2}$
Pu 241	$0.424 \cdot 10^{-3}$	$0.122 \cdot 10^{+2}$	$0.499 \cdot 10^{-5}$	$0.105 \cdot 10^{+1}$	$0.133 \cdot 10^{+2}$
Am 241	$0.864 \cdot 10^{-1}$	$0.123 \cdot 10^{+2}$	$0.107 \cdot 10^{-1}$	$0.119 \cdot 10^{+2}$	$0.243 \cdot 10^{+2}$
Cm 242	$0.472 \cdot 10^{-1}$	$0.104 \cdot 10^{+2}$	$0.114 \cdot 10^{-4}$	$0.140 \cdot 10^{-1}$	$0.105 \cdot 10^{+2}$
Cm 244	$0.851 \cdot 10^{-1}$	$0.123 \cdot 10^{+2}$	$0.237 \cdot 10^{-2}$	$0.253 \cdot 10^{+1}$	$0.149 \cdot 10^{+2}$

Tab. 3: Normierte integrale Konzentrationsfaktoren für den Expositionspfad "Ingestion" nach /24/



Freisetzungskategorie	KS <sub>min</sub>	$\overline{KS}$ (b/c) <sup>+</sup>	KS <sub>50%</sub>	KS <sub>95%</sub>	KS <sub>99%</sub>	KS <sub>max</sub>
FK1	0.0	0,84 (98,1/ 1,9)	0.0	3,7	3,7	3690
FK2	0.0	5,87 (88,8/11,2)	2.0	17,7	118	1960
FK3	0.0	0,18 (93,5/ 6,5)	0.0	0,3	4,4	81
FK4	0.0	0,09 (96,7/ 3,3)	0.0	0,06	1,5	55

<sup>+</sup>) bei b% der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner, bei c% größer als  $\overline{KS}$

Tab. 4 Charakteristische Größen der Kollektivschäden (Frühschäden) nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	Wahrscheinlichkeit für Frühschäden $\geq 1$
FK1	0,017
FK2	0,235
FK3	0,028
FK4	0,012

Tab. 5 Wahrscheinlichkeit für Frühschäden nach stattgefundenener Freisetzung

Freisetzungskategorie	Wolkenstrahlung	Bodenstrahlung	Inhalation aus der Wolke
FK1	6,8	90,6	2,6
FK2	12,7	42,7	44,6
FK3	19,8	33,0	47,2
FK4	25,8	38,3	35,9

Tab. 6 Prozentuale Anteile der Expositionspfade an den Fröh-schäden bei den einzelnen Freisetzungskategorien, aufgeschlüsselt aufgrund der Dosisbeiträge

Freisetzungskategorie	KS <sub>min</sub>	$\overline{KS}$ (b/c) <sup>+</sup>	KS <sub>50%</sub>	KS <sub>95%</sub>	KS <sub>99%</sub>	KS <sub>max</sub>
FK1	2850	38750 (48,1/51,9)	39250	46500	53000	91690
FK2	1490	18740 (39,4/60,6)	19330	22170	25500	41720
FK3	410	3800 (53,5/46,5)	3820	4750	5670	8570
FK4	63	892 (61,5/38,5)	847	1370	1630	2520
FK5	38	466 (49,1/50,9)	472	605	675	1060
FK6	10	367 (47,9/52,1)	374	480	530	836
FK7	45	1378 (62,5/37,5)	1290	2240	2530	4990
FK8	< 1	0,01 (68,3/31,7)	0,01	0,02	0,04	0,1

<sup>+</sup>) bei b% der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner, bei c% größer als  $\overline{KS}$

Tab. 7a Charakteristische Größen der Kollektivschäden (Spätschäden) bei den lebenden Generationen LG nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	KS <sub>min</sub>	$\overline{KS}$ (b/c) <sup>+) )</sup>	KS <sub>50%</sub>	KS <sub>95%</sub>	KS <sub>99%</sub>	KS <sub>max</sub>
FK1	315	3960 (54,0/46,0)	3960	4900	5150	5630
FK2	161	2460 (61,3/38,7)	2380	3350	3650	4240
FK3	46	490 (63,6/36,4)	465	750	870	1500
FK4	6	82 (63,3/36,7)	73	150	185	441
FK5	4	24 (62,8/37,2)	22	43	52	129
FK6	0,4	12 (65,3/34,7)	11	19	23	61
FK7	6	166 (63,7/36,3)	148	290	355	1050
FK8	<< 1	<< 1	<< 1	<< 1	<< 1	<< 1

<sup>+) )</sup> bei b% der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner, bei c% größer als  $\overline{KS}$

Tab. 7b Charakteristische Größen der Kollektivschäden (Spätschäden) bei den folgenden Generationen FG nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	KS <sub>min</sub>	$\overline{KS}$ (b/c) <sup>+</sup>	KS <sub>50%</sub>	KS <sub>95%</sub>	KS <sub>99%</sub>	KS <sub>max</sub>
FK1	3170	42720 (47,9/52,1)	43200	51000	57500	96250
FK2	1660	21190 (40,1/59,9)	21670	25170	28330	44120
FK3	457	4290 (54,4/45,6)	4300	5450	6400	9800
FK4	69	974 (62,1/37,9)	920	1520	1800	2830
FK5	42	490 (50,0/50,0)	495	640	720	1150
FK6	11	379 (47,8/52,2)	390	495	550	884
FK7	51	1540 (62,9/37,1)	1440	2520	2880	6040
FK8	<< 1	0,01 (68,0/32,0)	0,01	0,02	0,05	0,1

<sup>+</sup>) bei b% der Fälle ist der Kollektivschaden kleiner, bei c% größer als  $\overline{KS}$

Tab. 7c Charakteristische Größen der Kollektivschäden (Spätschäden) bei allen Generationen AG nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

EXPOSITIONSPFAD	K R E B S A R T						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.02	0.01	0.02	0.0	0.02	0.05	0.11
BODENSTRAHLUNG (0-7D)	0.30	0.08	0.24	0.05	0.32	0.65	1.63
BODENSTRAHLUNG (>7D)	3.11	0.85	3.02	0.62	4.04	8.09	19.73
INHALATION AUS DER WOLKE	0.23	0.17	9.62	3.18	0.49	0.97	14.65
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.02	0.03	1.65	0.0	0.07	0.13	1.91
INGESTION	10.44	2.74	6.76	16.83	8.39	16.79	61.96
TEILSUMME	14.12	3.87	21.31	20.69	13.34	26.67	100.00

Tab. 8a Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten (FK1)

EXPOSITIONSPFAD	KREBSART						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.05	0.14
BODENSTRAHLUNG (0-70)	0.36	0.10	0.30	0.07	0.40	0.80	2.02
BODENSTRAHLUNG (>70)	4.10	1.12	4.06	0.81	5.43	10.86	26.39
INHALATION AUS DER WOLKE	0.46	0.50	3.20	5.13	0.39	0.77	10.46
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.04	0.07	0.29	0.0	0.02	0.05	0.47
INGESTION	11.36	3.01	7.28	11.77	9.03	18.06	60.52
TEILSUMME	16.36	4.81	15.15	17.78	15.30	30.60	100.00

Tab. 8b Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten (FK2)



EXPOSITIONSPFAD	K R E B S A R T						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.05	0.01	0.03	0.01	0.05	0.09	0.24
BODENSTRAHLUNG (0-7D)	0.34	0.09	0.28	0.06	0.37	0.75	1.90
BODENSTRAHLUNG (>7D)	3.85	1.05	3.80	0.76	5.09	10.18	24.73
INHALATION AUS DER WOLKE	0.42	0.51	3.27	4.60	0.36	0.71	9.87
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.04	0.08	0.33	0.0	0.03	0.05	0.54
INGESTION	11.90	3.17	7.56	11.99	9.37	18.74	62.73
TEILSUMME	16.59	4.92	15.28	17.43	15.26	30.53	100.00

Tab. 8c Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositonspfaden und Krebsarten (FK3)

EXPOSITIONSPFAD	KREBSART						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.15	0.04	0.10	0.03	0.14	0.28	0.73
BODENSTRAHLUNG (0-7D)	0.30	0.08	0.24	0.05	0.32	0.64	1.63
BODENSTRAHLUNG (>7D)	2.18	0.60	2.13	0.43	2.85	5.71	13.89
INHALATION AUS DER WOLKE	0.23	0.28	1.87	5.73	0.21	0.42	8.75
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.02	0.05	0.19	0.0	0.02	0.03	0.30
INGESTION	10.60	2.74	6.99	28.24	8.71	17.41	74.69
TEILSUMME	13.48	3.78	11.52	34.49	12.25	24.49	100.00

Tab. 8d Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten (FK4)

EXPOSITIONSPFAD	K R E B S A R T						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.09	0.03	0.05	0.02	0.07	0.15	0.41
BODENSTRAHLUNG (0-7D)	0.26	0.07	0.20	0.05	0.28	0.55	1.41
BODENSTRAHLUNG (>7D)	1.10	0.30	1.04	0.21	1.39	2.79	6.83
INHALATION AUS DER WOLKE	0.10	0.12	0.86	5.58	0.10	0.21	6.98
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.01	0.02	0.09	0.0	0.01	0.01	0.15
INGESTION	5.55	1.42	3.73	59.27	4.76	9.51	84.23
TEILSUMME	7.11	1.96	5.97	65.13	6.61	13.22	100.00

Tab. 8e Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten (FK5)

EXPOSITIONSPFAD	K R E B S A R T						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.12	0.03	0.06	0.02	0.09	0.19	0.51
BODENSTRAHLUNG (0-70)	0.27	0.07	0.21	0.05	0.29	0.57	1.46
BODENSTRAHLUNG (>70)	0.64	0.18	0.58	0.12	0.78	1.56	3.86
INHALATION AUS DER WOLKE	0.05	0.06	0.47	6.34	0.07	0.13	7.12
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.01	0.01	0.05	0.0	0.00	0.01	0.08
INGESTION	2.49	0.63	1.70	75.23	2.30	4.61	86.97
TEILSUMME	3.58	0.99	3.07	81.77	3.53	7.06	100.00

Tab. 8f Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten (FK6)

EXPOSITIONSPFAD	K R E B S A R T						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.01	0.0	0.01	0.0	0.01	0.01	0.04
BODENSTRAHLUNG (0-7D)	0.06	0.01	0.05	0.01	0.06	0.13	0.31
BODENSTRAHLUNG (>7D)	2.84	0.78	2.85	0.56	3.80	7.61	18.44
INHALATION AUS DER WOLKE	0.08	0.02	0.11	0.80	0.10	0.20	1.30
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.01	0.03
INGESTION	13.91	3.30	10.06	15.40	12.40	24.81	79.88
TEILSUMME	16.90	4.11	13.07	16.77	16.38	32.77	100.00

Tab. 8g Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten (FK7)

EXPOSITIONSPFAD	K R E B S A R T						TEIL- SUMME
	LEUKAEMIE	KNOCHEN- KREBS	LUNGEN- KREBS	SCHILDDR. KREBS	BRUST- KREBS	ANDERE KREBSART.	
WOLKENSTRAHLUNG	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.05	0.13
BODENSTRAHLUNG (0-7D)	0.17	0.05	0.14	0.03	0.18	0.37	0.94
BODENSTRAHLUNG (>7D)	2.72	0.74	2.69	0.54	3.59	7.19	17.47
INHALATION AUS DER WOLKE	0.14	0.10	3.10	2.42	0.22	0.45	6.44
INHALATION NACH RESUSPENSION	0.01	0.01	0.51	0.0	0.02	0.05	0.61
INGESTION	11.43	2.82	7.97	22.61	9.87	19.73	74.43
TEILSUMME	14.51	3.72	14.42	25.60	13.92	27.83	100.00

Tab. 8h Relative Aufteilung der Spätschäden nach Expositionspfaden und Krebsarten (alle FK)

Freisetzungskategorie	Anteil der Spätschäden jenseits 540 km		
	/ % /		
	lebende Generationen LG	folgende Generationen FG	alle Generationen AG
FK1	70,3 (49,7)	77,8 (45,8)	71,0 (49,3)
FK2	65,6 (38,1)	62,5 (26,0)	65,2 (36,4)
FK3	48,6 (23,6)	46,7 (15,7)	48,4 (22,5)
FK4	31,1 (13,5)	33,8 (9,5)	31,3 (13,1)
FK5	32,6 (20,7)	34,0 (11,9)	32,7 (20,1)
FK6	33,3 (25,4)	38,5 (17,5)	33,4 (25,0)
FK7	35,2 (11,6)	38,3 (10,7)	35,5 (11,5)
FK8	8,0 (2,7)	23,8 (4,8)	8,6 (2,9)

Tab. 9 Anteil der mittleren Kollektivschäden bzw. des Kollektivrisikos jenseits von 540 km. Die Ergebnisse der DRS nach /25/ sind in Klammern angegeben.

Freisetzungskategorie	Anteil der Krebsfälle durch Strahlendosen oberhalb $D_{GR}$ [%]						Anteil der genetisch sign. Dosen oberhalb 5rem [%]
	Ganzkörper $D_{GR} = 5 \text{ rem}$	Knochenmark $D_{GR} = 5 \text{ rem}$	Lunge $D_{GR} = 15 \text{ rem}$	Knochenoberfl. $D_{GR} = 30 \text{ rem}$	Schilddrüse $D_{GR} = 15 \text{ rem}$	insgesamt	
FK1	14,25	12,92	46,64	2,66	14,27	20,99	7,67
FK2	16,53	17,32	15,40	5,58	24,96	17,64	9,28
FK3	7,61	8,40	8,53	3,80	14,80	9,06	3,89
FK4	2,50	2,66	5,52	2,74	7,36	4,62	1,35
FK5	0,74	0,71	2,11	0,65	1,69	1,46	0,40
FK6	0,00	0,00	0,00	0,00	1,16	1,02	0,05
FK7	2,02	1,90	0,10	0,00	1,10	1,51	1,02

Tab. 10 Prozentualer Anteil der Krebsfälle und genetisch signifikanten Kollektivdosen durch Strahlendosen oberhalb der Grenzwerte  $D_{GR}$  der Strahlenschutzverordnung (§ 28)



Freisetzungskategorie	$KD_{\min}$ [man·rem]	$\overline{KD}$ (b/c) <sup>+) )</sup> [man·rem]	$KD_{50\%}$ [man·rem]	$KD_{95\%}$ [man·rem]	$KD_{99\%}$ [man·rem]	$KD_{\max}$ [man·rem]
FK1	$2,3 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^8$ (26,3/73,7)	$2,7 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^8$	$3,5 \cdot 10^8$
FK2	$1,2 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$ (32,8/67,2)	$1,6 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^8$
FK3	$3,4 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^7$ (48,9/51,1)	$3,1 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^7$
FK4	$4,6 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^6$ (62,8/37,2)	$5,2 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$
FK5	$2,4 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$ (63,5/36,5)	$1,4 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^6$	$7,1 \cdot 10^6$
FK6	$2,8 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^5$ (69,1/30,9)	$4,8 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	$4,9 \cdot 10^6$
FK7	$4,6 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^7$ (63,1/36,9)	$1,2 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$4,3 \cdot 10^7$
FK8	3,4	$7,3 \cdot 10^1$ (67,2/32,7)	$6,0 \cdot 10^1$	$1,6 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	$7,8 \cdot 10^2$

+) bei b% der Fälle ist die Kollektivdosis kleiner, bei c% größer als  $\overline{KD}$

Tab. 11 Charakteristische Größen der genetisch signifikanten Kollektivdosen (alle Generationen AG) nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

Expositionspfad	Freisetzungskategorie								alle FK
	FK1	FK2	FK3	FK4	FK5	FK6	FK7	FK8	
Wolkenstrahlung	0,11	0,12	0,20	0,74	0,70	1,78	0,03	46,31	0,11
Bodenstrahlung (0 - 7 d)	1,70	1,85	1,71	1,78	2,79	5,88	0,25	0,15	0,88
Bodenstrahlung (> 7 d)	19,90	23,12	21,44	14,33	13,46	15,85	13,58	4,28	15,79
Inhalation aus der Wolke	0,94	1,53	1,32	0,86	0,69	0,66	0,53	0,80	0,70
Inhalation nach Resuspension	0,06	0,07	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,01	0,04
Ingestion	77,28	73,29	75,26	82,25	82,33	75,79	85,58	48,46	82,48

Tab. 12 Prozentuale Aufteilung der genetisch signifikanten Dosis nach Expositionspfaden

Freisetzungskategorie	$F_{\min}$   km <sup>2</sup>	$\bar{F}$ (b/c) <sup>+</sup>   km <sup>2</sup>	$F_{50\%}$   km <sup>2</sup>	$F_{95\%}$   km <sup>2</sup>	$F_{99\%}$   km <sup>2</sup>	$F_{\max}$   km <sup>2</sup>
FK1	0.0	5,36 (88,7/11,3)	0.0	28,5	152	187
FK2	0.0	4,02 (70,0/30,0)	0.0	26,8	27,3	150
FK3	0.0	0,02 (99,5/ 0,5)	0.0	0.0	0.0	4,2
FK4-FK8	0.0	0,0	0.0	0.0	0.0	0.0

<sup>+</sup>) bei b% der Fälle ist die betroffene Fläche kleiner, bei c% größer als  $\bar{F}$

Tab. 13 Charakteristische Größen der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet B1 + B2) betroffenen Flächen nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	$P_{\min}$	$\bar{P}$ (b/c) <sup>+</sup>	$P_{50\%}$	$P_{95\%}$	$P_{99\%}$	$P_{\max}$
FK1	0.0	1460 (91,8/ 8,2)	0.0	5690	32'900	631'840
FK2	0.0	1180 (85,0/15,0)	0.0	5930	21'900	160'170
FK3	0.0	6 (99,6/ 0,4)	0.0	0.0	0.0	15'770
FK4-FK8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

<sup>+</sup>) bei b% der Fälle ist die Personenzahl kleiner, bei c% größer als  $\bar{P}$

Tab. 14 Charakteristische Größen der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet B1+B2) betroffenen Personenzahlen (25 Anlagen) nach erfolgter Freisetzung

Freisetzungskategorie	$F_{\min}$  km <sup>2</sup>	$\bar{F}$ (b/c) <sup>+</sup>  km <sup>2</sup>	$F_{50\%}$  km <sup>2</sup>	$F_{95\%}$  km <sup>2</sup>	$F_{99\%}$  km <sup>2</sup>	$F_{\max}$  km <sup>2</sup>
FK1	0.0	139,8 (83,1/16,9)	3,1	885	2240	3140
FK2	0.68	74,4 (78,0/22,0)	11,5	392	935	1150
FK3	0.09	5,2 (79,4/20,6)	1,4	20	52	151
FK4	0.0	0,48 (71,0/29,0)	0,16	2,5	2,5	4,4
FK5	0.0	$1,3 \cdot 10^{-2}$ (90,4/ 9,6)	0.0	0,1	0,2	0,8
FK6	0.0	$1,5 \cdot 10^{-4}$ (99,8/ 0,2)	0.0	0.0	0.0	0,06
FK7	0.0	0,22 (92,6/ 7,4)	0.0	0,4	9,1	16,9
FK8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

<sup>+</sup>) bei b% der Fälle ist die betroffene Fläche kleiner, bei c% größer als  $\bar{F}$

Tab. 15 Charakteristische Größen der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Flächen nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	$P_{\min}$	$\bar{P}$ (b/c) <sup>+</sup>	$P_{50\%}$	$P_{95\%}$	$P_{99\%}$	$P_{\max}$
FK1	0.0	36550 (86,8/13,2)	2180	240'000	630'000	2'184'000
FK2	0.0	20480 (82,9/17,1)	2220	111'000	281'670	2'220'000
FK3	0.0	1320 (84,0/16,0)	430	5'970	21'300	426'300
FK4	0.0	74 (88,2/11,8)	0.0	400	1'530	16'680
FK5	0.0	1,5 (98,8/ 1,2)	0.0	0.0	15	2'160
FK6	0.0	0,0	0.0	0.0	0.0	0.0
FK7	0.0	54 (97,0/ 3,0)	0.0	67	1'130	66'720
FK8	0.0	0,0	0.0	0.0	0.0	0.0

<sup>+</sup>) bei b% der Fälle ist die Personenzahl kleiner, bei c% größer als  $\bar{P}$

Tab. 16 Charakteristische Größen der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Personenzahlen nach erfolgter Freisetzung (25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	Gebiet D1 (Dekontamination)	Milch im 1. Jahr	Milch in den Folgejahren	andere landwirtsch. Produkte im 1. Jahr	andere landwirtsch. Produkte in den Folgejahren
	$\bar{F}$ [km <sup>2</sup> ]	$\bar{F}$ [km <sup>2</sup> ]	$\bar{F}$ [km <sup>2</sup> ]	$\bar{F}$ [km <sup>2</sup> ]	$\bar{F}$ [km <sup>2</sup> ]
FK1	3200	64360	1840	38830	6650
FK2	2170	63050	1210	40340	5950
FK3	172	45150	78	13020	557
FK4	8	27070	3	1170	22
FK5	1	22490	0,3	100	2
FK6	0,07	20740	0,008	17	0,01
FK7	18	7860	0,6	3730	13
FK8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab.17 Mittlere Flächen der von den Schutz- und Gegenmaßnahmen "Dekontamination" sowie "Einschränkungen beim Verzehr landwirtschaftlicher Produkte" betroffenen Gebiete nach erfolgter Freisetzung

Freisetzungskategorie	Kollektivrisiko für Frühschäden $ a^{-1} $	Kollektivrisiko für Spätschäden $ a^{-1} $			Erwartungswert der Kollektivdosen $ man \cdot rem \cdot a^{-1} $
		lebende Generationen LG	folgende Generationen FG	alle Generationen AG	
FK1	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^0$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^4$
FK2	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^3$
FK3	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^2$
FK4	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^2$
FK5	0.0	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$7,8 \cdot 10^2$
FK6	0.0	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^3$
FK7	0.0	$3,4 \cdot 10^0$	$4,2 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^0$	$3,2 \cdot 10^4$
FK8	0.0	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^0$
Summe	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^0$	$7,0 \cdot 10^{-1}$	$7,4 \cdot 10^0$	$5,0 \cdot 10^4$

Tab. 18 Kollektivrisiken der gesundheitlichen Schäden und Erwartungswerte der genetisch signifikanten Kollektivdosen (25 Anlagen)



Freisetzungskategorie	Erwartungswerte der Flächen  km <sup>2</sup> a <sup>-1</sup>				Erwartungswerte der Personenzahlen  a <sup>-1</sup>		
	Gebiet A	Gebiet B1	Gebiet B1+B2	Gebiet C	Gebiet A	Gebiet B1+B2	Gebiet C
FK1	1,7·10 <sup>-3</sup>	8,9·10 <sup>-5</sup>	2,7·10 <sup>-4</sup>	7,0·10 <sup>-3</sup>	3,1·10 <sup>-1</sup>	7,3·10 <sup>-2</sup>	1,8·10 <sup>0</sup>
FK2	5,0·10 <sup>-4</sup>	5,4·10 <sup>-5</sup>	6,0·10 <sup>-5</sup>	1,1·10 <sup>-3</sup>	9,4·10 <sup>-2</sup>	1,8·10 <sup>-2</sup>	3,1·10 <sup>-1</sup>
FK3	5,0·10 <sup>-4</sup>	2,6·10 <sup>-7</sup>	2,6·10 <sup>-7</sup>	7,8·10 <sup>-5</sup>	9,4·10 <sup>-2</sup>	9,4·10 <sup>-5</sup>	2,0·10 <sup>-2</sup>
FK4	2,5·10 <sup>-3</sup>	0.0	0.0	3,6·10 <sup>-5</sup>	4,7·10 <sup>-1</sup>	0.0	5,6·10 <sup>-3</sup>
FK5	1,7·10 <sup>-2</sup>	0.0	0.0	6,5·10 <sup>-6</sup>	3,1·10 <sup>0</sup>	0.0	7,5·10 <sup>-4</sup>
FK6	5,8·10 <sup>-2</sup>	0.0	0.0	2,6·10 <sup>-7</sup>	1,1·10 <sup>1</sup>	0.0	0.0
FK7	8,3·10 <sup>-2</sup>	0.0	0.0	5,6·10 <sup>-4</sup>	1,6·10 <sup>1</sup>	0.0	1,4·10 <sup>-1</sup>
FK8	8,3·10 <sup>-1</sup>	0.0	0.0	0.0	1,6·10 <sup>2</sup>	0.0	0.0
Summe	1,0·10 <sup>0</sup>	1,4·10 <sup>-4</sup>	3,3·10 <sup>-4</sup>	8,8·10 <sup>-3</sup>	1,9·10 <sup>2</sup>	9,1·10 <sup>-2</sup>	2,3·10 <sup>0</sup>

Tab. 19 Erwartungswerte der von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Personen und Flächen  
(25 Anlagen)

Freisetzungskategorie	Reduktion der Flächen /%/				Reduktion der Personenzahlen /%/		
	Gebiet A	Gebiet B1	Gebiet B1+B2	Gebiet C	Gebiet A	Gebiet B1+B2	Gebiet C
FK1	0	73,8	70,7	76,7	0	71,9	78,0
FK2	0	37,2	40,0	74,4	0	40,0	74,2
FK3	0	84,7	84,7	81,0	0	83,8	81,8
FK4	0	-	-	80,0	0	-	84,0
FK5	0	-	-	95,4	0	-	95,6
FK6	0	-	-	98,3	0	-	100,0
FK7	0	-	-	93,9	0	-	93,3
FK8	0	-	-	-	0	-	-
Summe	0	67,4	67,0	80,4	0	68,6	80,3

Tab. 20 Prozentuale Verringerung der Erwartungswerte der von den Schutz- und Gegenmaßnahmen betroffenen Flächen und Personen gegenüber den Ergebnissen der DRS Phase A /2/

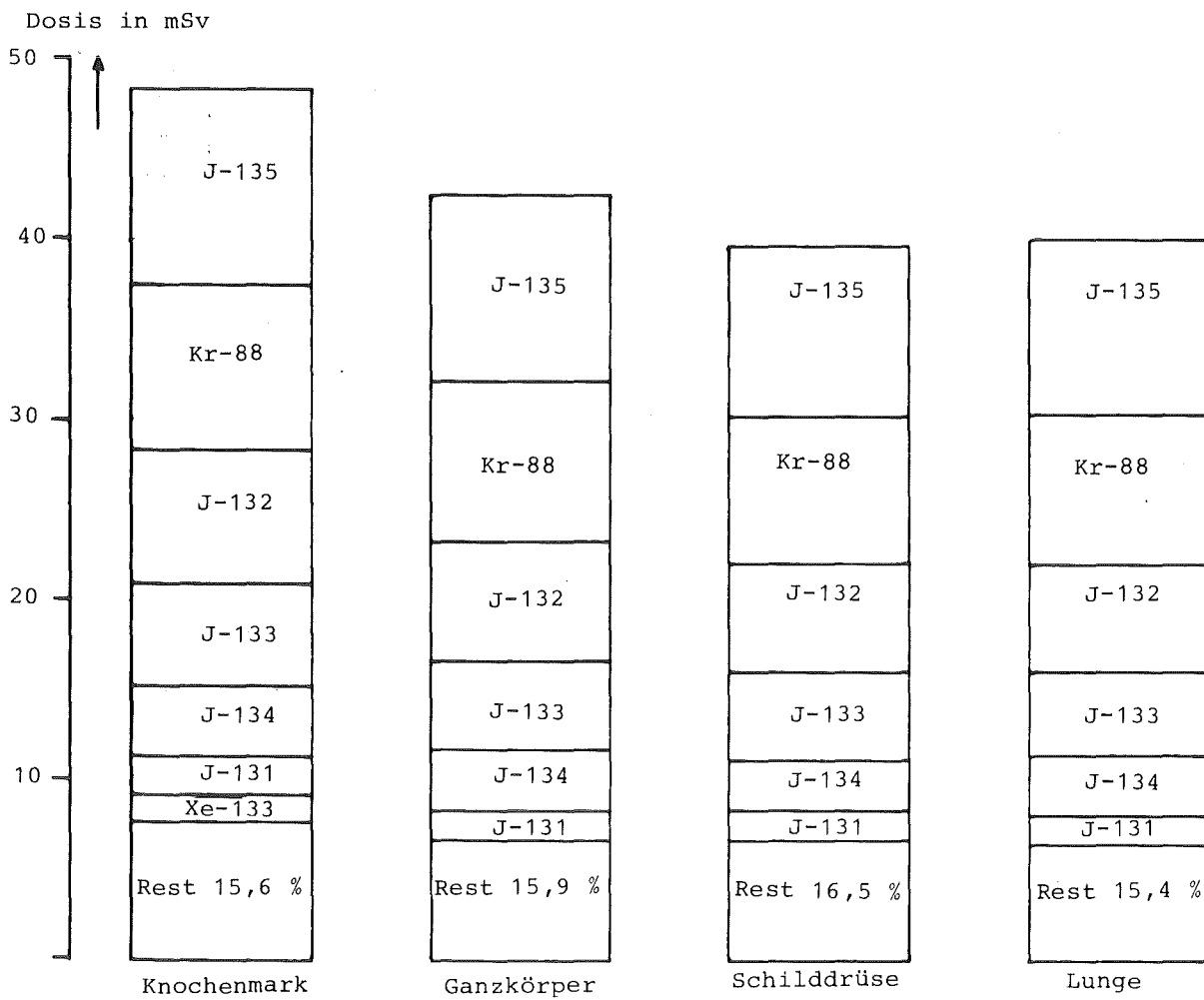


Abb. 1 Externe Bestrahlung aus der Aktivitätsfahne  
(Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf  
"neutral", Entfernung 10 km)

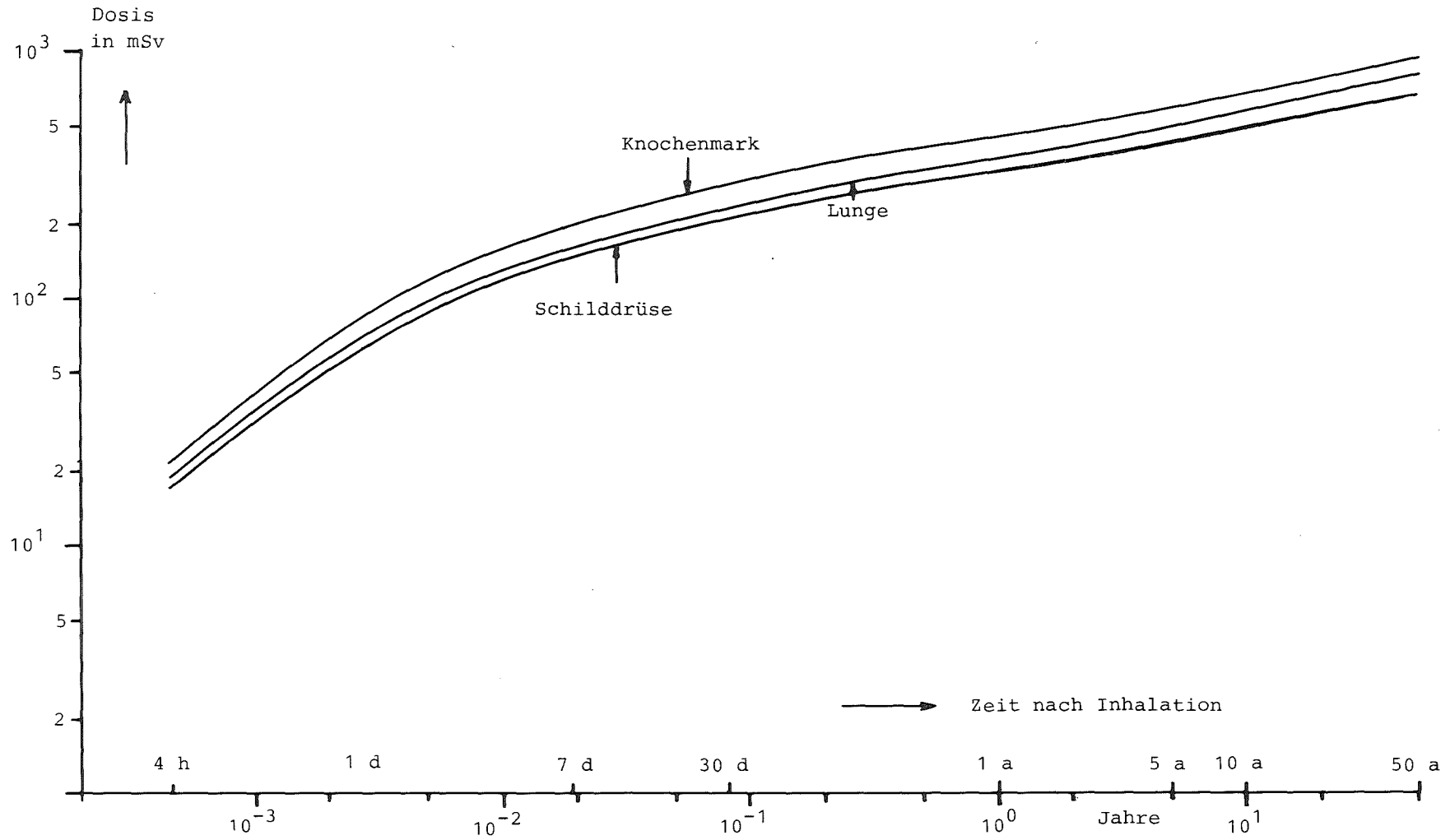


Abb. 2 Zeitliche Entwicklung der Dosis durch externe Bestrahlung vom Boden (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

Zahlenangaben in Prozent

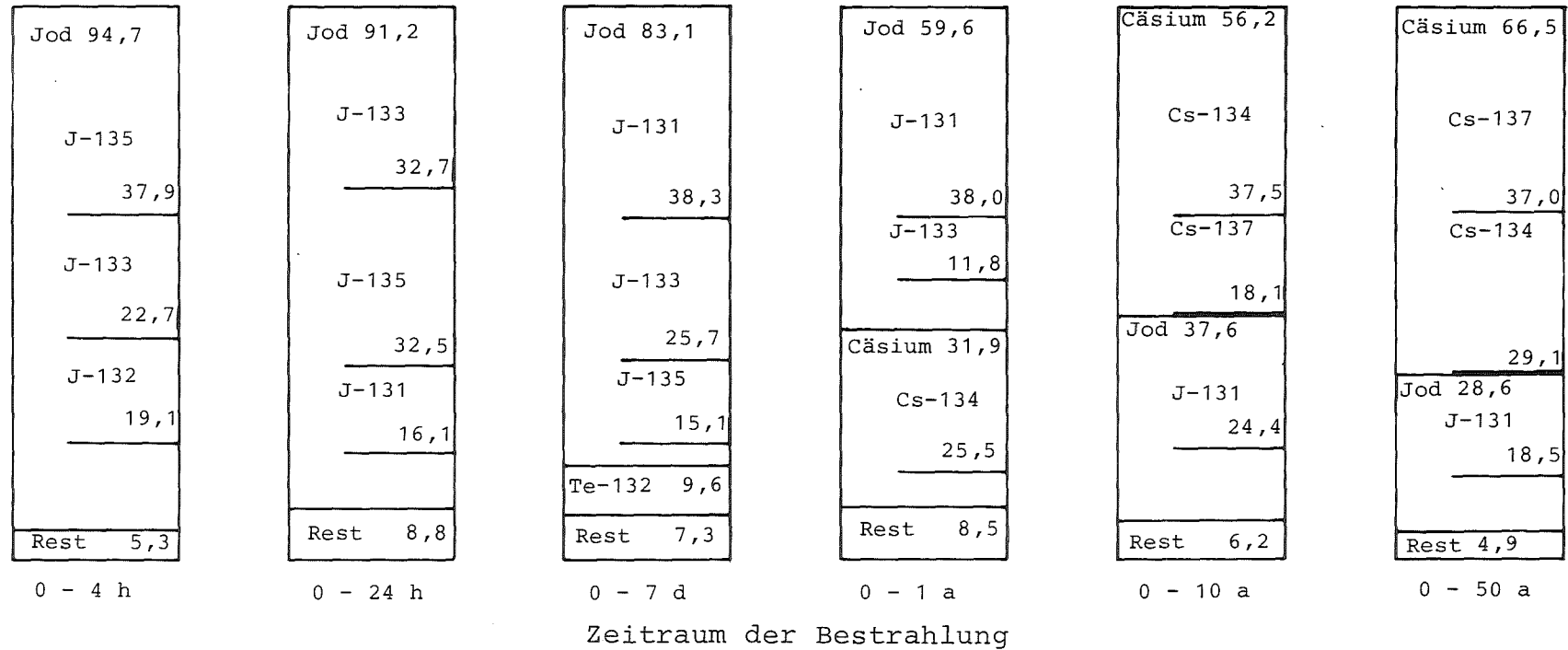


Abb. 3 Knochenmarksdosis durch externe Bestrahlung vom Boden (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

Zahlenangaben in Prozent

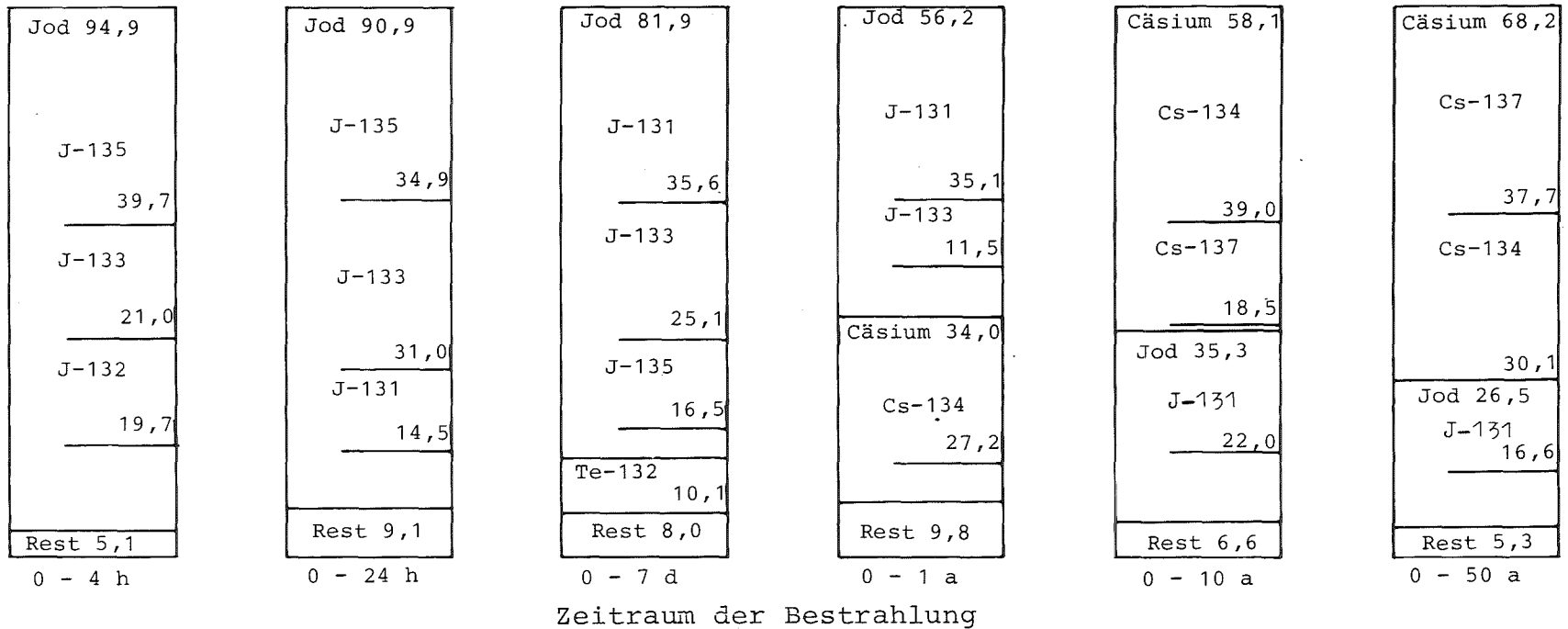


Abb. 4 Lungendosis durch externe Bestrahlung vom Boden (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

Zahlenangaben in Prozent

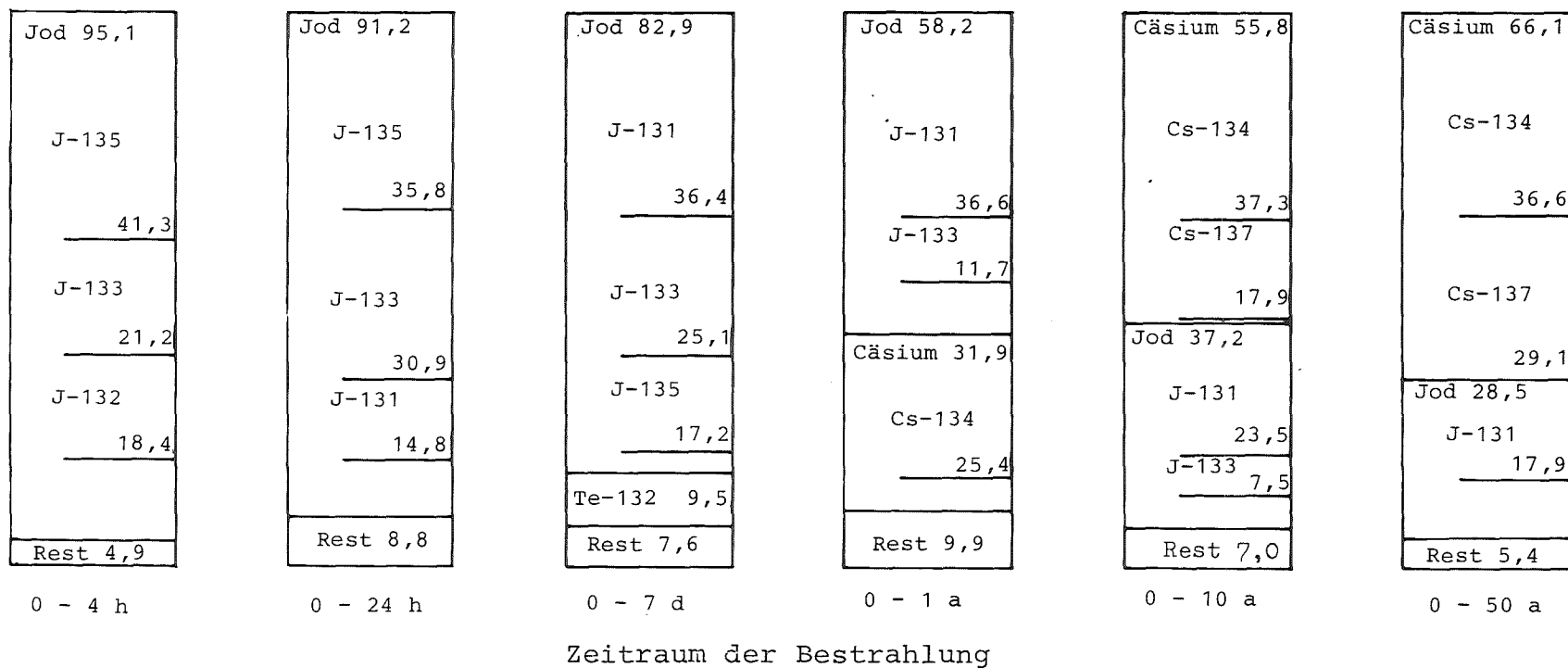


Abb. 5 Schilddrüsenedosis durch externe Bestrahlung vom Boden (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

Zahlenangaben in Prozent

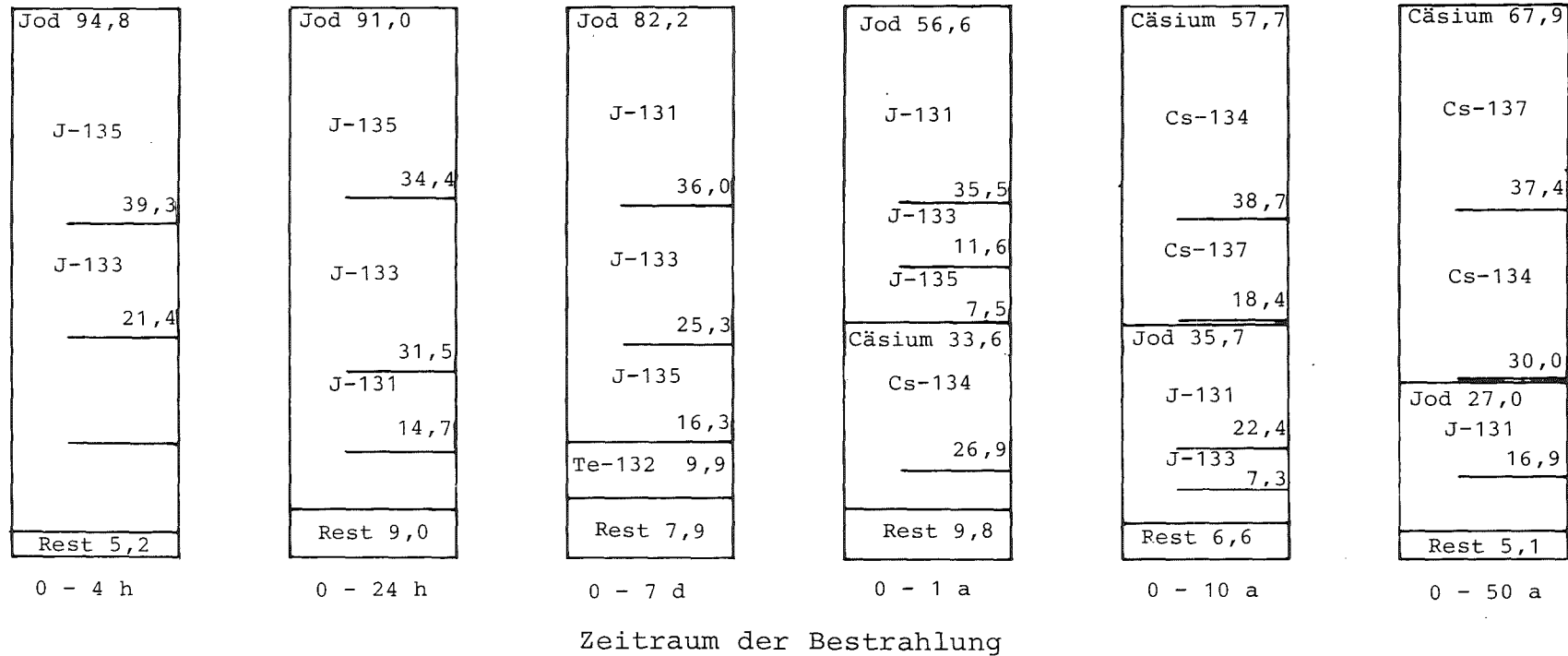


Abb. 6 Ganzkörperdosis durch externe Bestrahlung vom Boden (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)



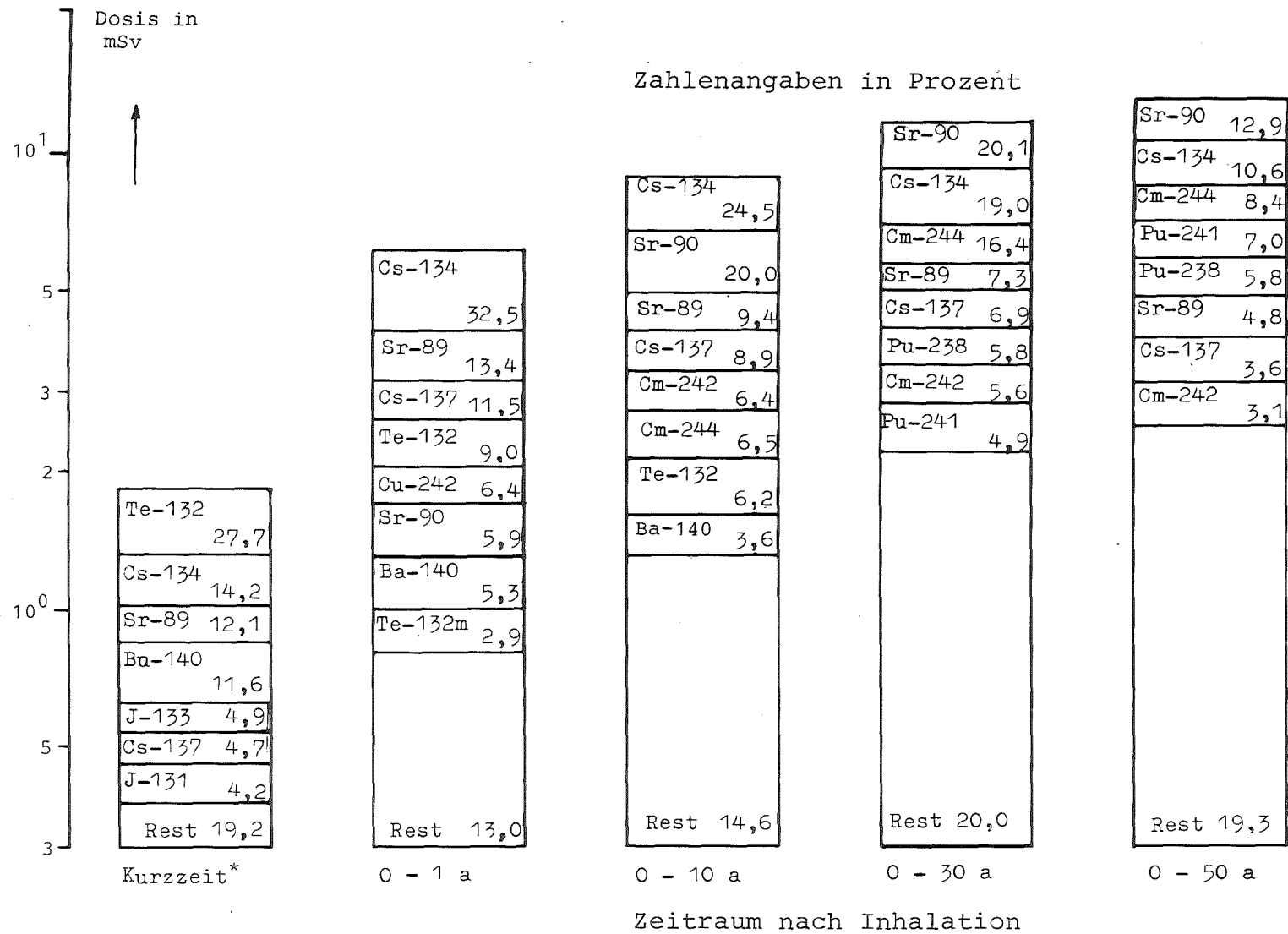


Abb. 7 Knochenmarksdosis durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

\*Kurzzeitdosis =  $D(7d) + \frac{1}{2} D(8d \rightarrow 30d)$

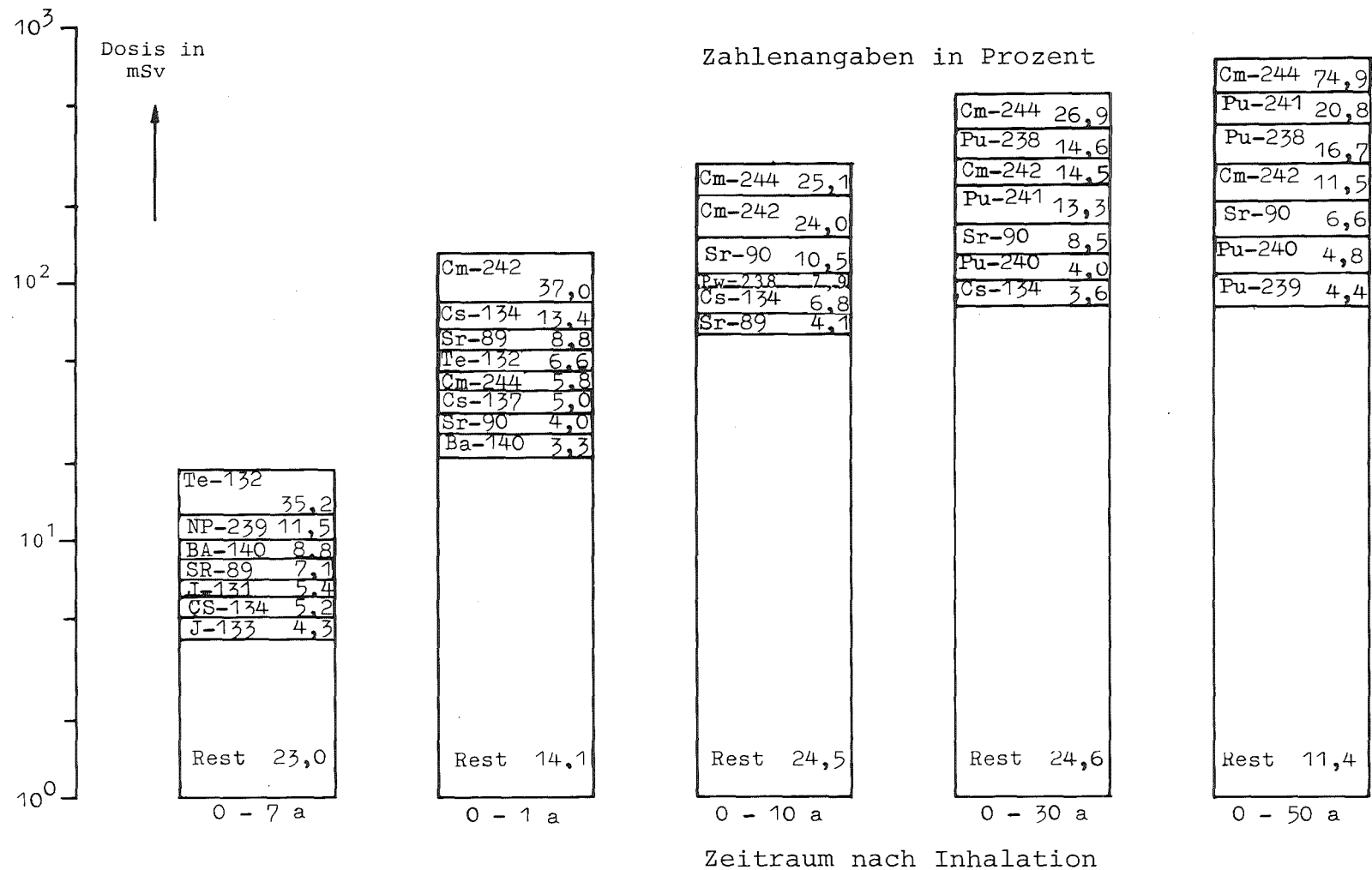


Abb. 8 Knochenoberflächendosis durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

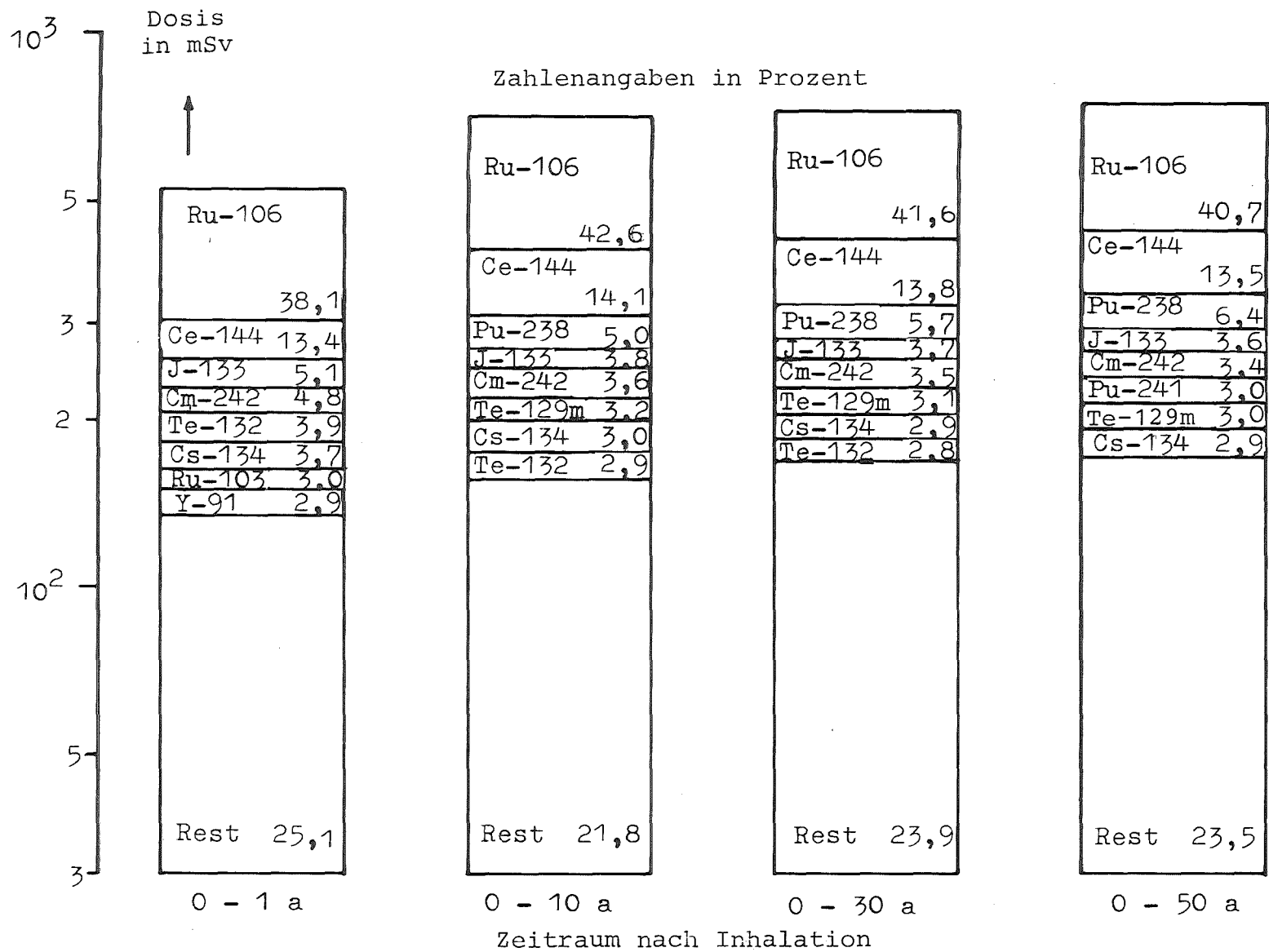


Abb. 9 Lungendosis durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

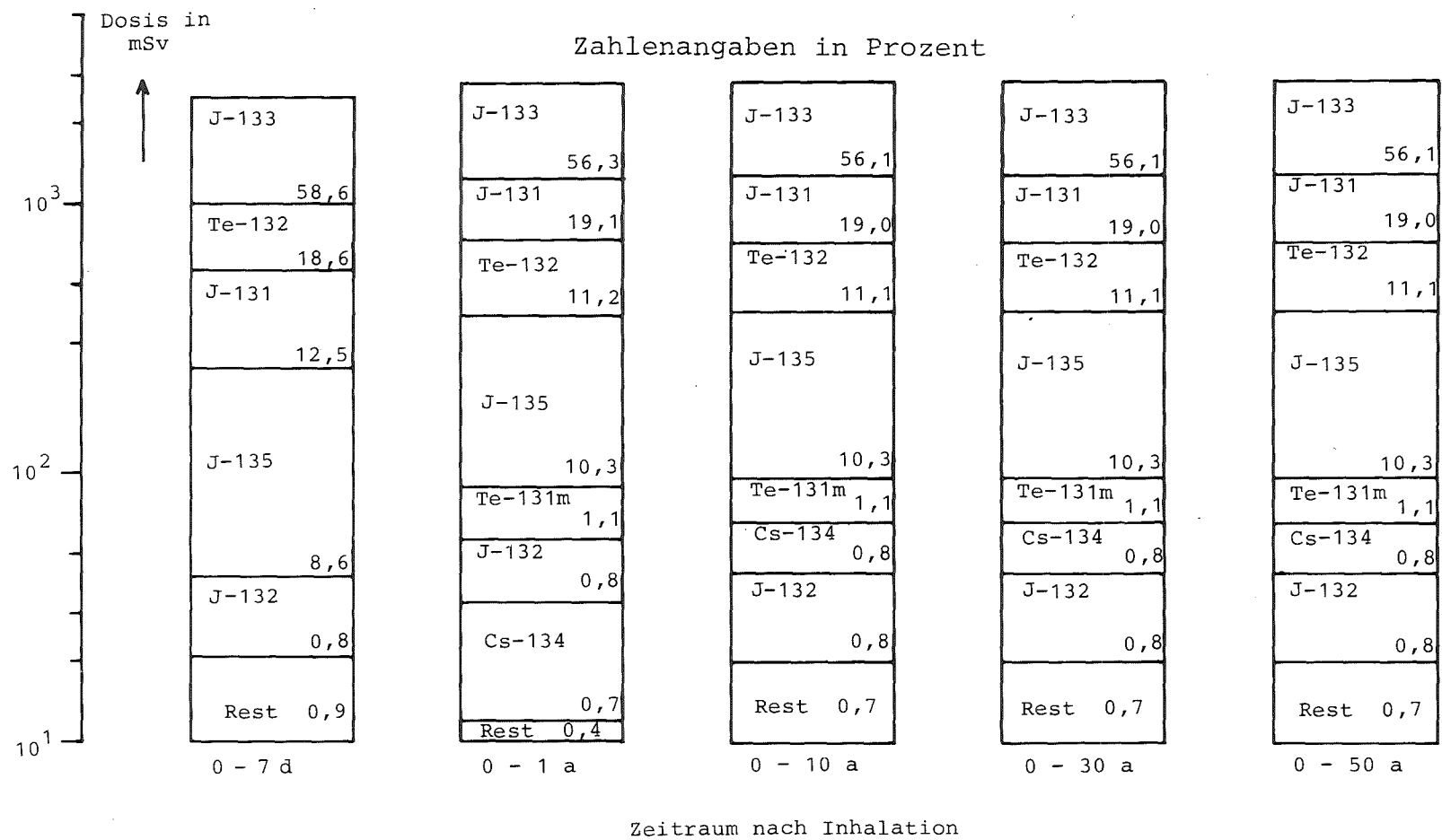


Abb. 10: Schilddrüsendosis durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

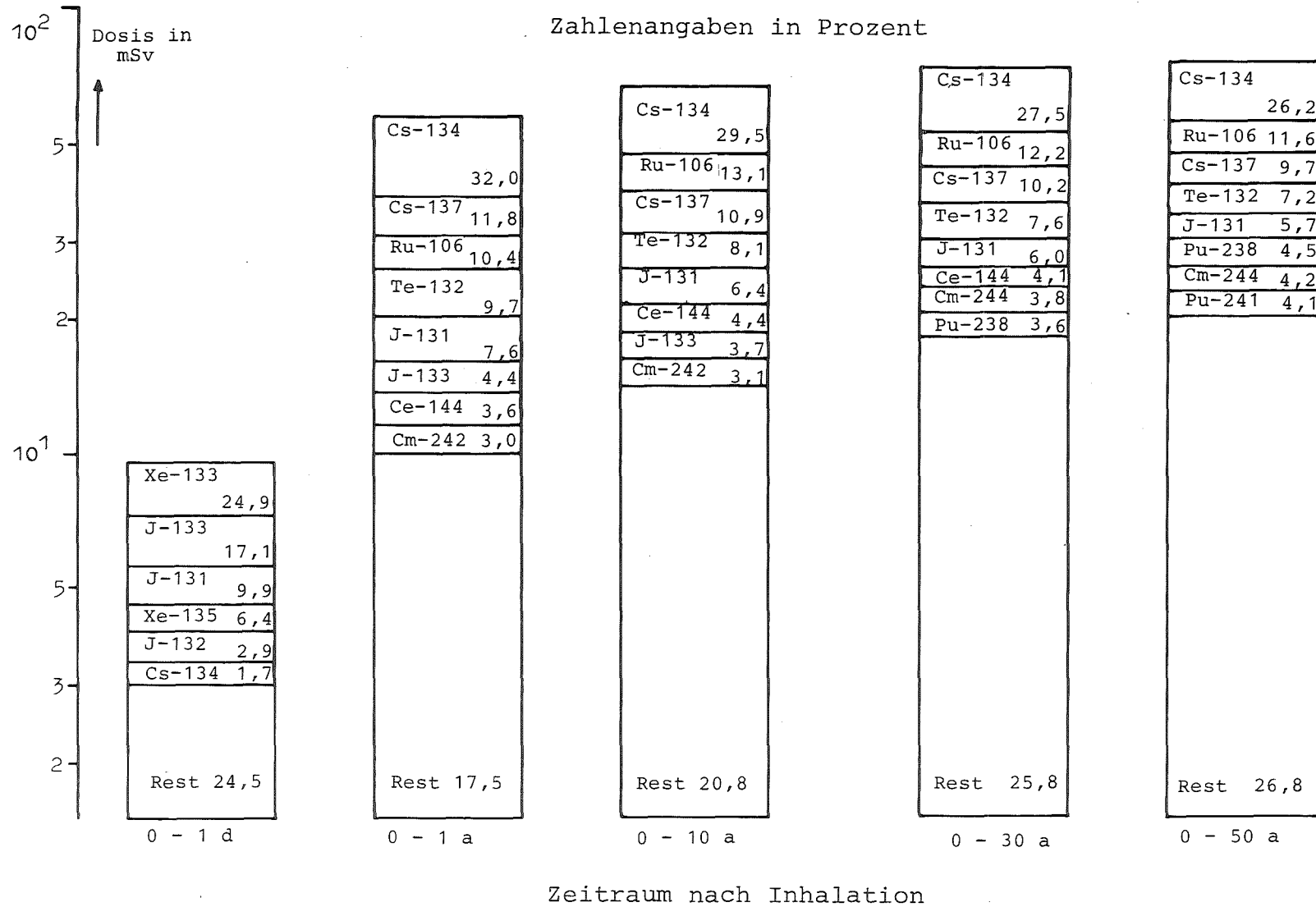


Abb. 11 Ganzkörperdosis durch Inhalation (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

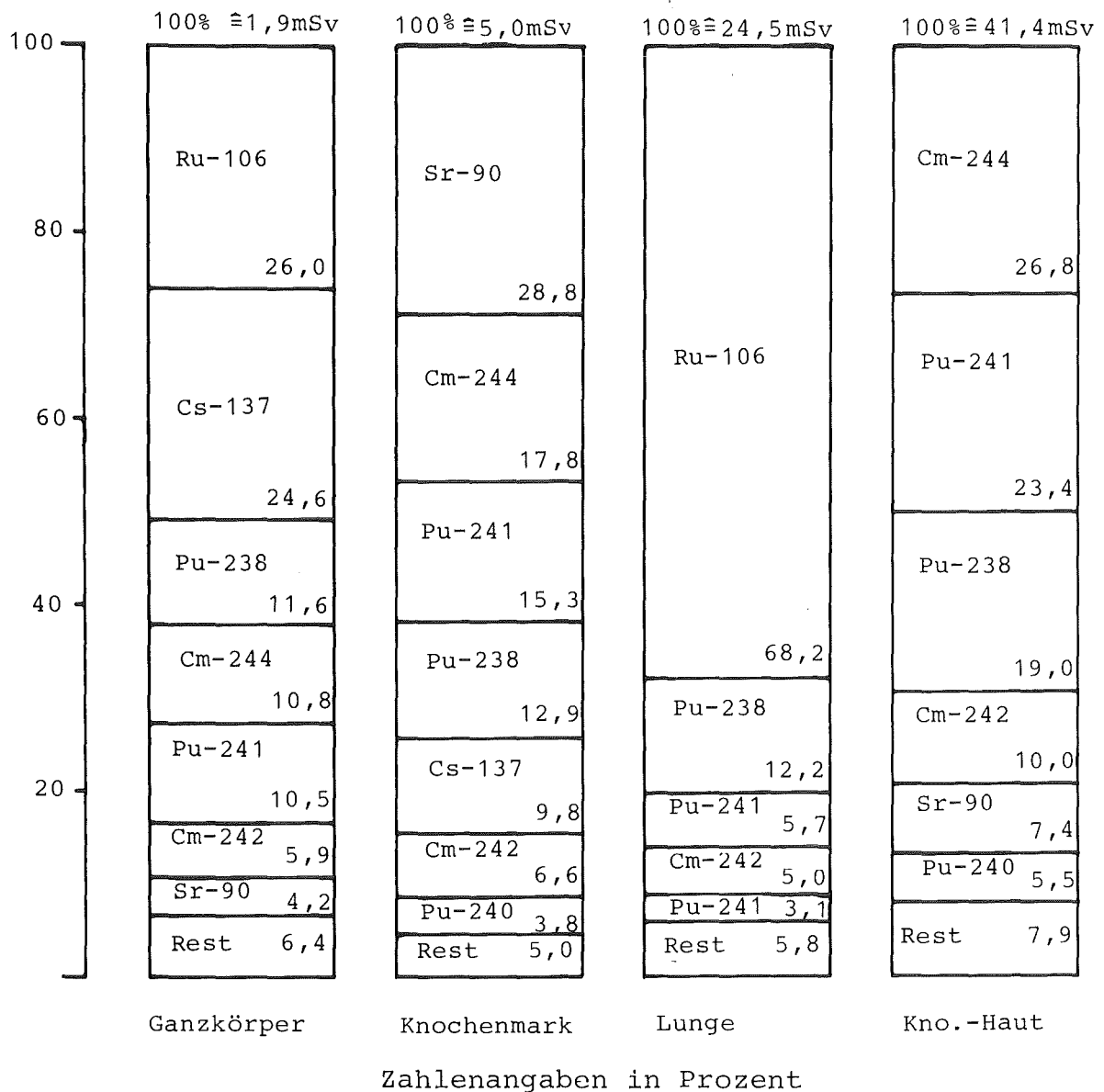


Abb. 12: Inhalationsdosis durch die infolge Resuspension mit der Atemluft inkorporierten Aktivität. Folgedosen über 50 a durch die Inkorporation im Zeitraum 0 - 10 a (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

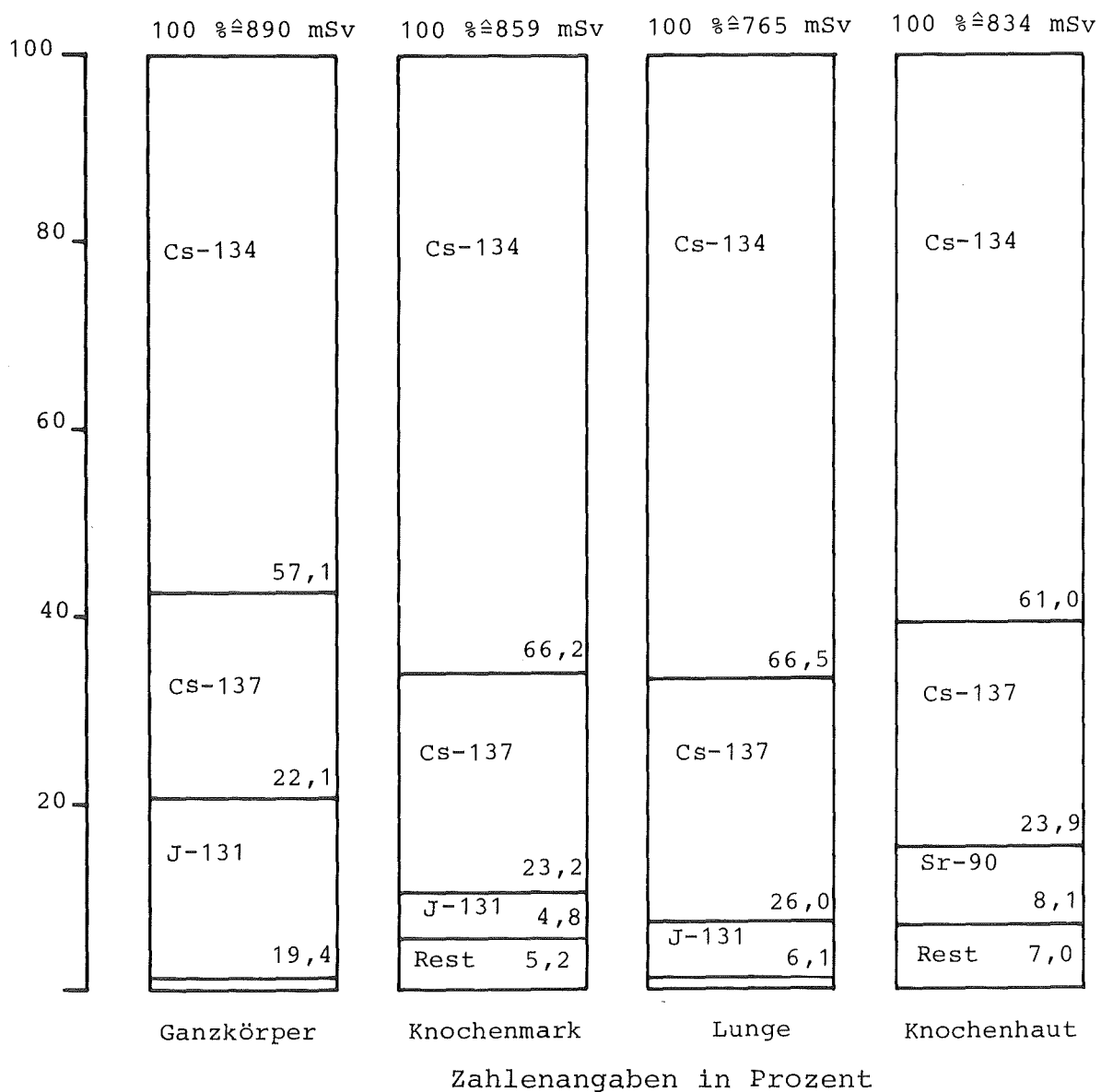


Abb. 13: Folgedosis über 50 Jahre nach Ingestion von Milch im 1. Jahr nach Unfalleintritt (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)

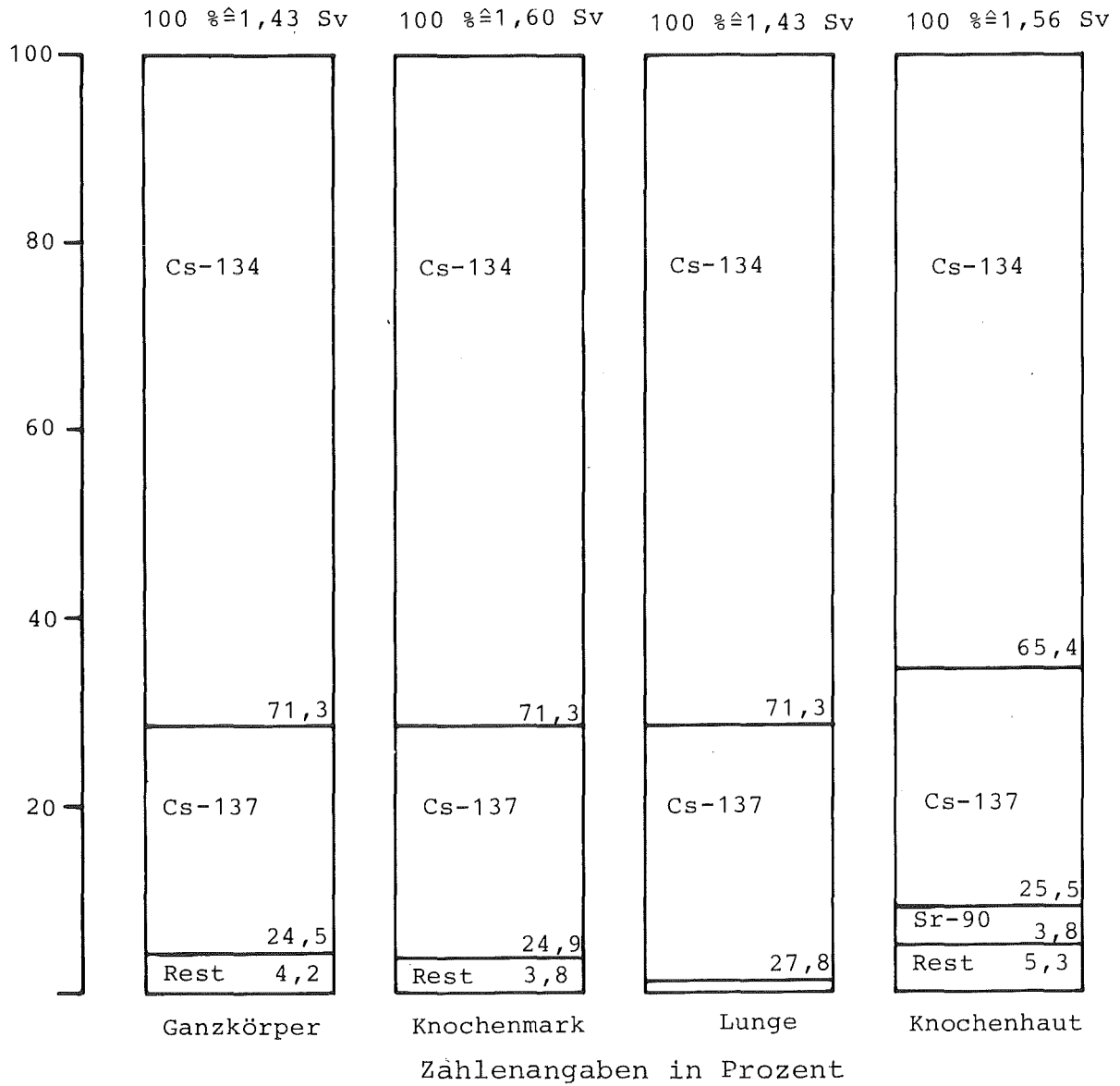


Abb. 14: Folgedosis über 50 Jahre nach Ingestion anderer landwirtschaftlicher Produkte im 1. Jahr nach Unfalleintritt (Freisetzungskategorie FK2, Wetterablauf "neutral", Entfernung 10 km)



Häufigkeit von Kollektivschäden  $\geq$  KS bei 25 Anlagen [a<sup>-1</sup>]

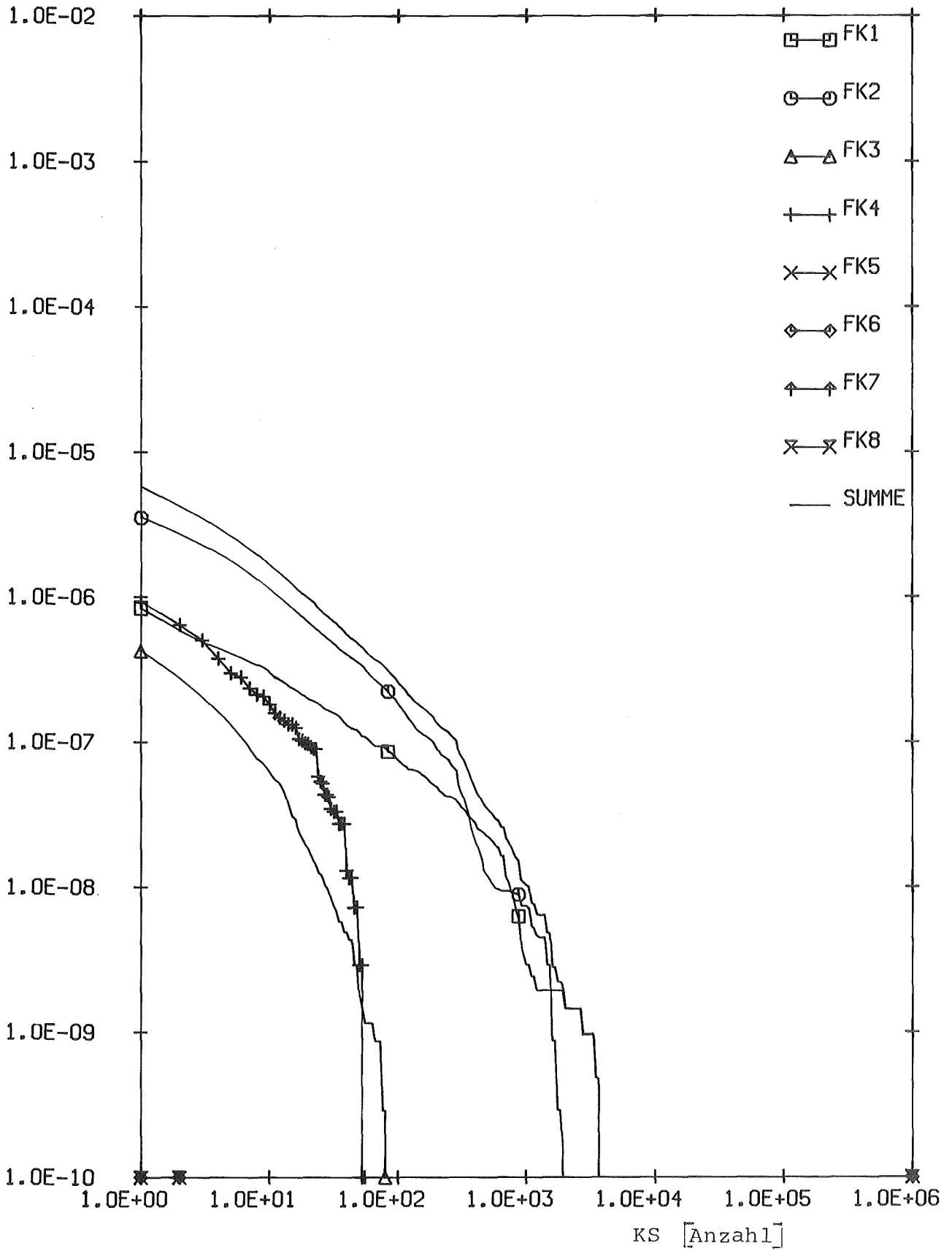


Abb. 15 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Kollektivschäden (Frühschäden)

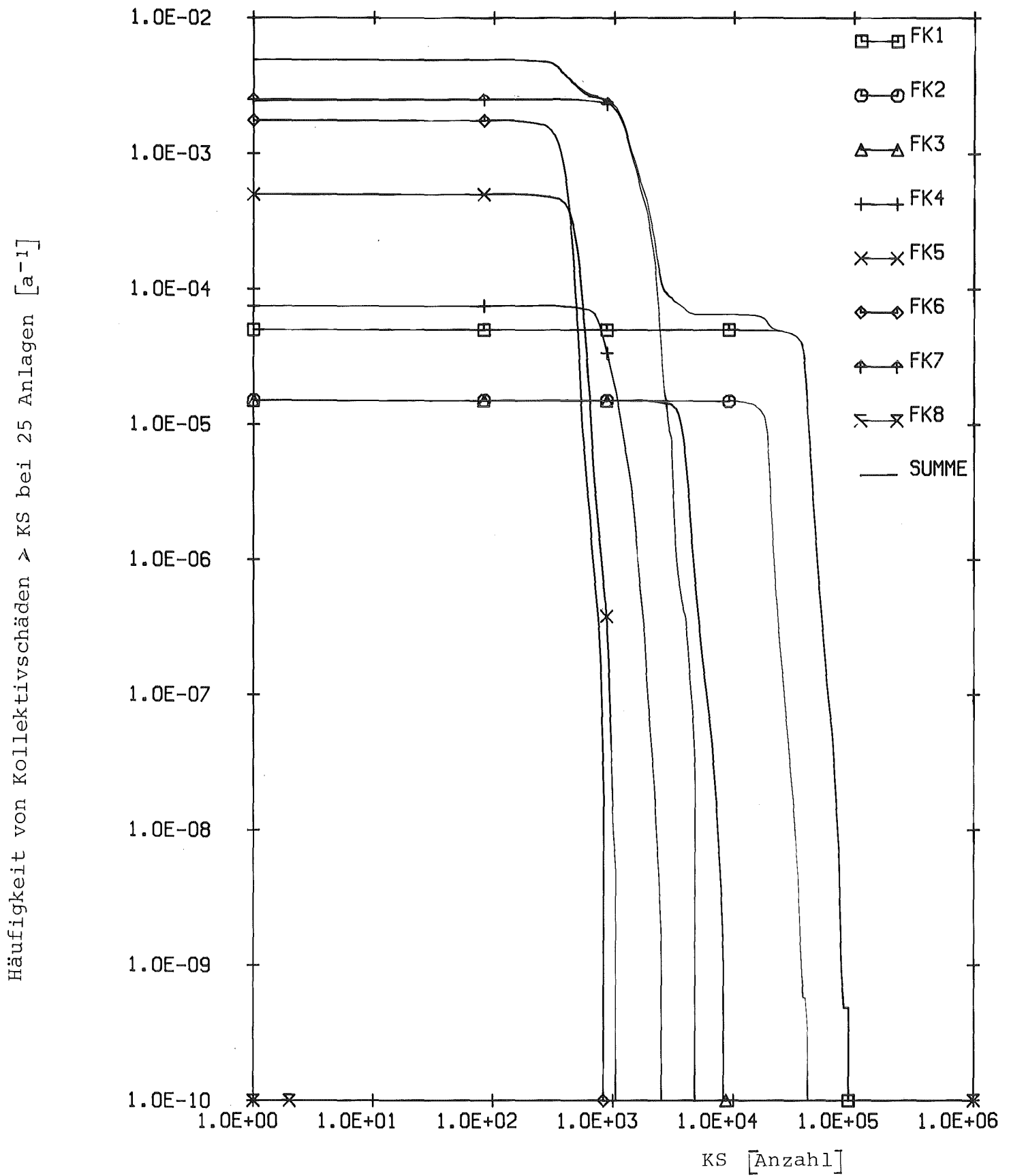


Abb. 16a Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Kollektivschäden (Spätschäden) bei den lebenden Generationen (LG)

Häufigkeit von Kollektivschäden  $\geq$  KS bei 25 Anlagen [a<sup>-1</sup>]

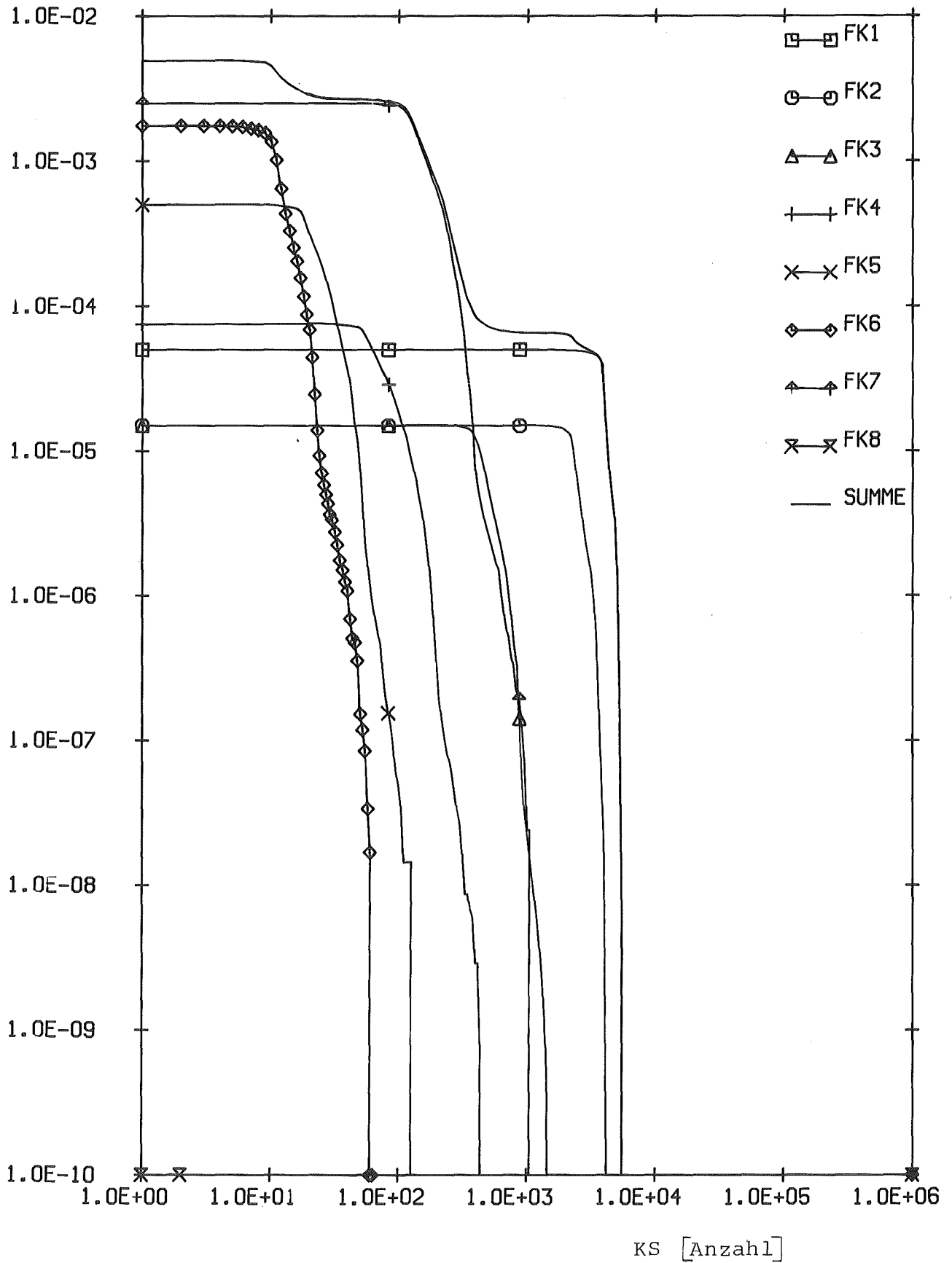


Abb. 16b Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Kollektivschäden (Spätschäden) bei den folgenden Generationen (FG)

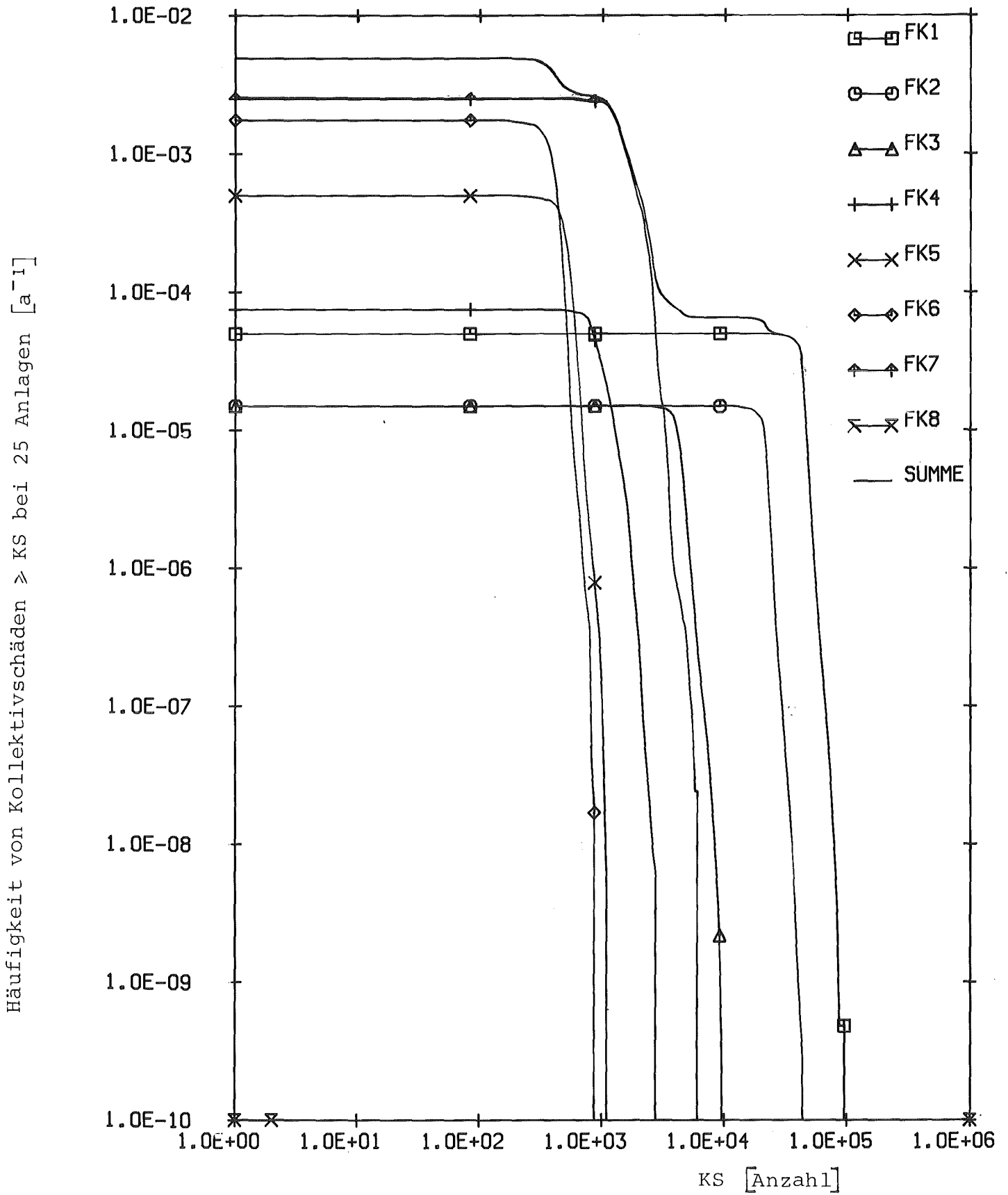


Abb. 16c Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der Kollektivschäden (Spätschäden) bei allen Generationen (AG)

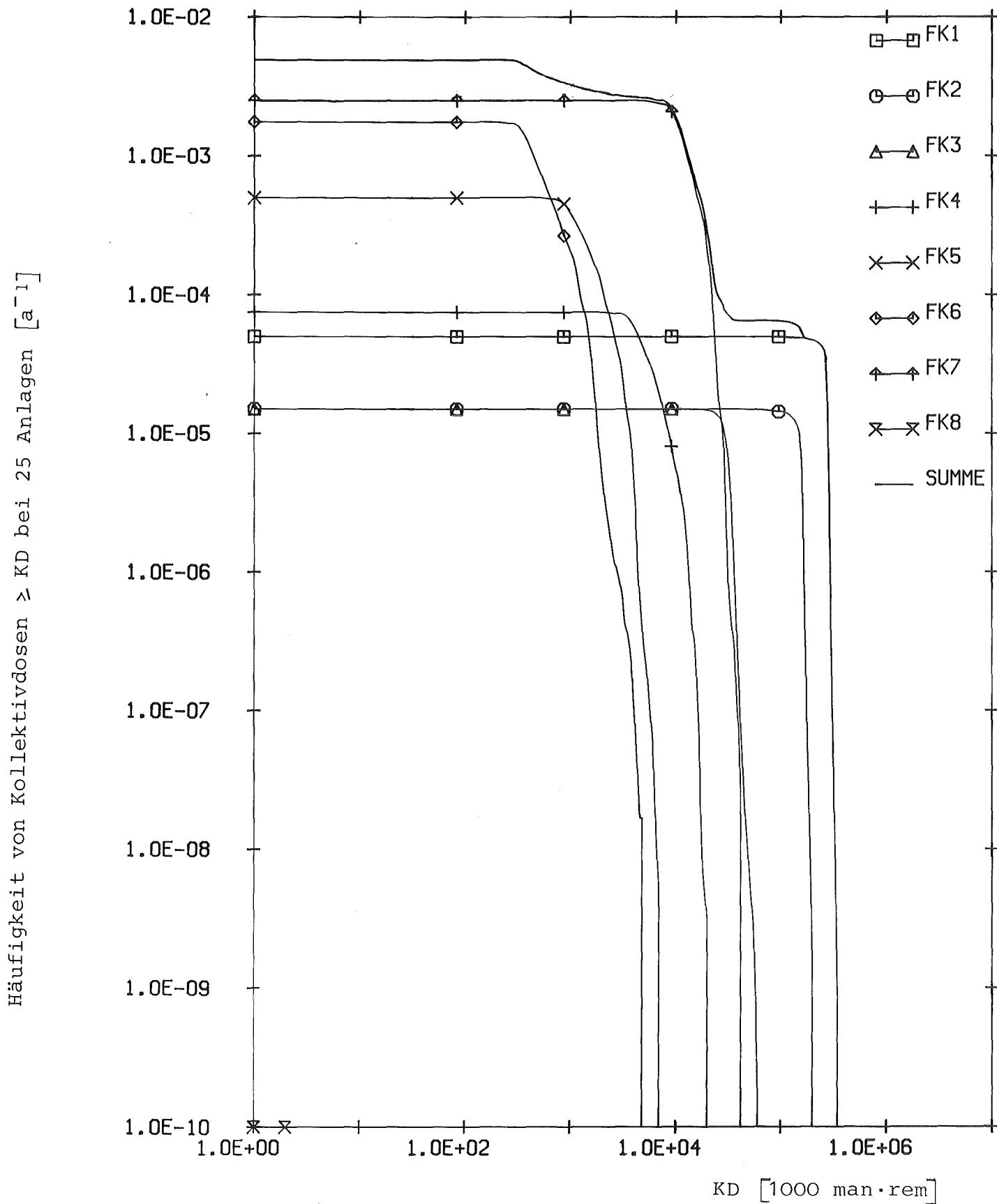


Abb. 17 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der genetisch signifikanten Kollektivdosen (alle Generationen AG)

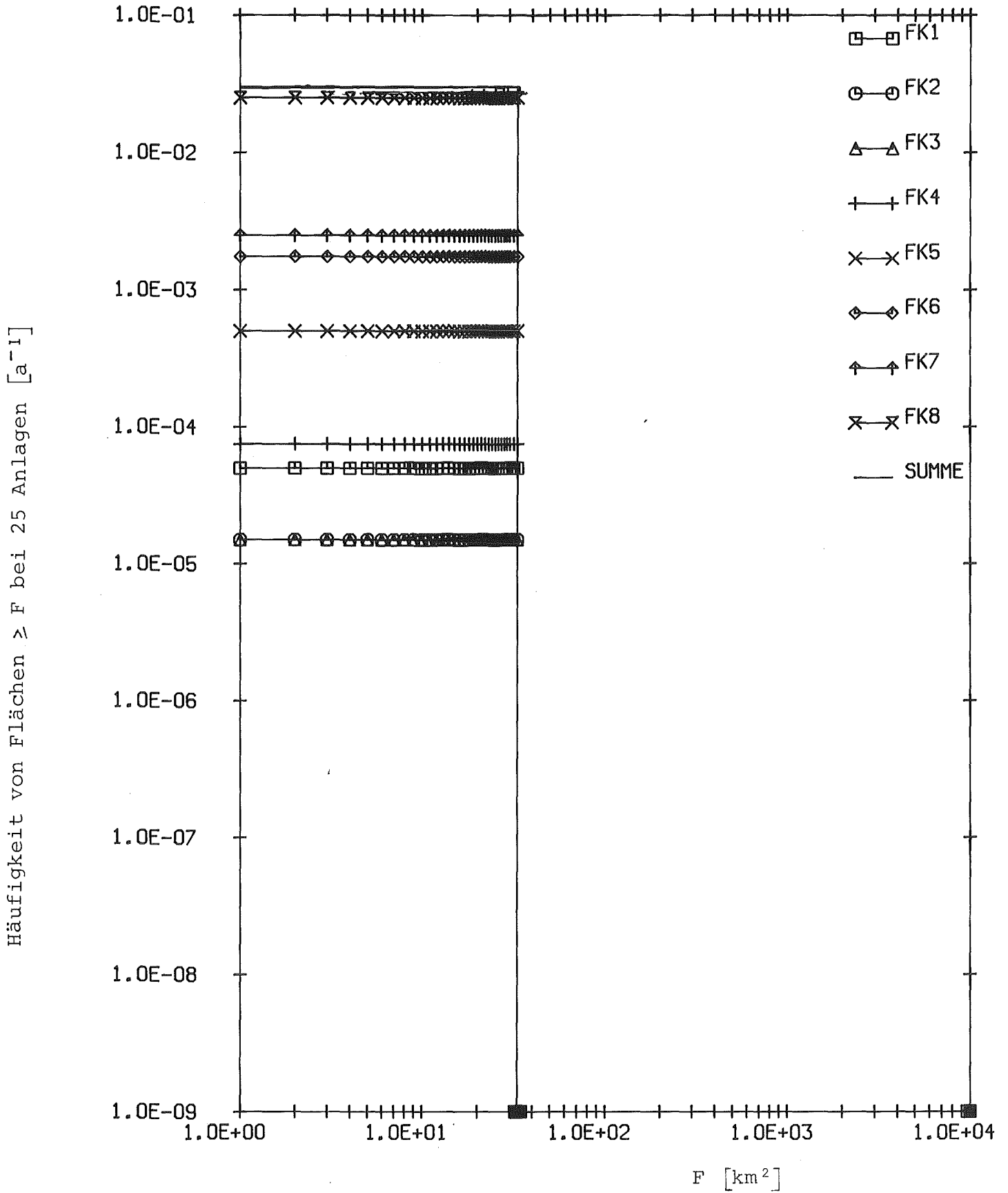


Abb. 18 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Evakuierung" (Gebiet A) betroffenen Flächen

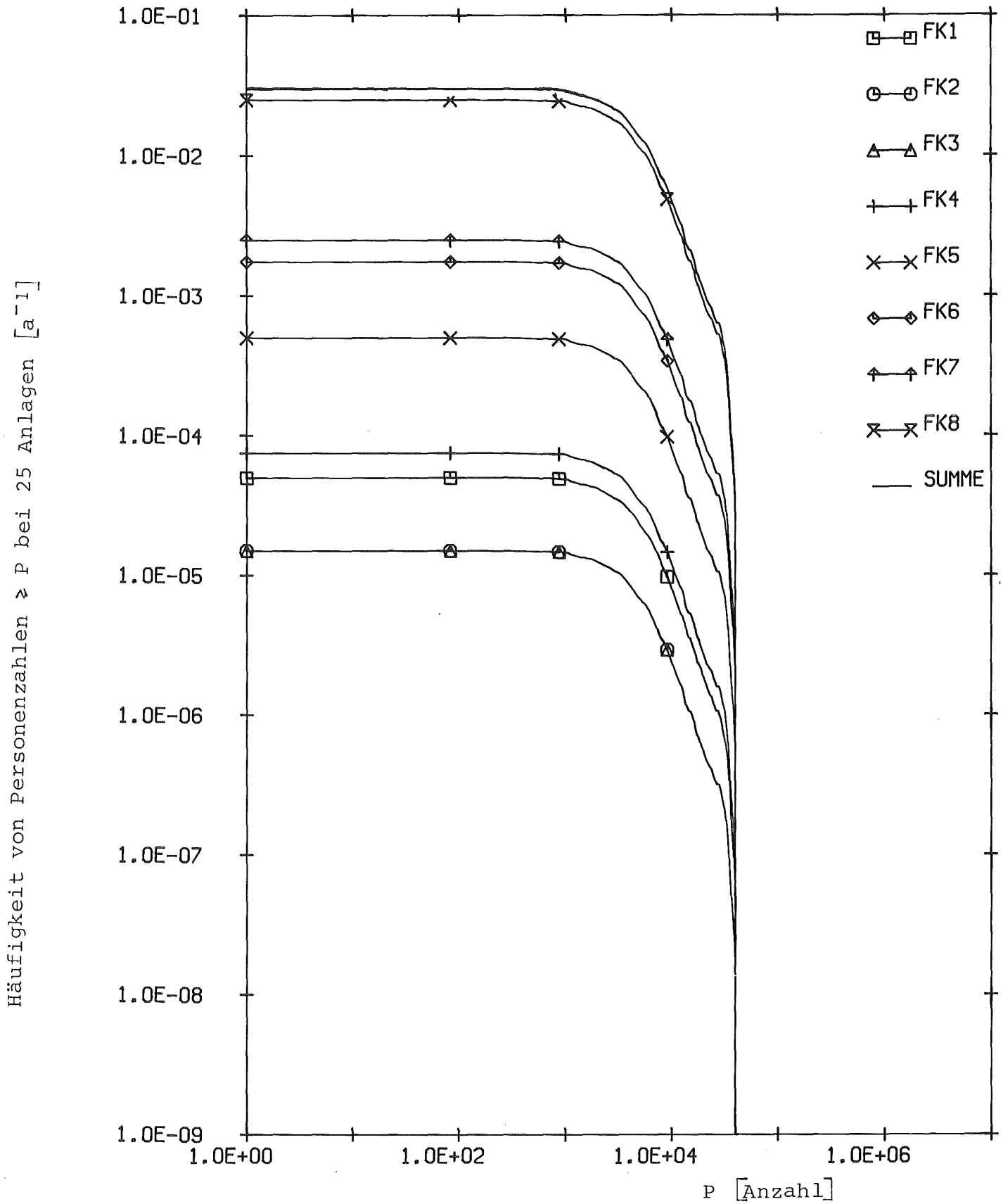


Abb. 19 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Evakuierung" (Gebiet A) betroffenen Personenzahlen

Häufigkeit von Flächen  $\geq F$  bei 25 Anlagen  $[a^{-1}]$

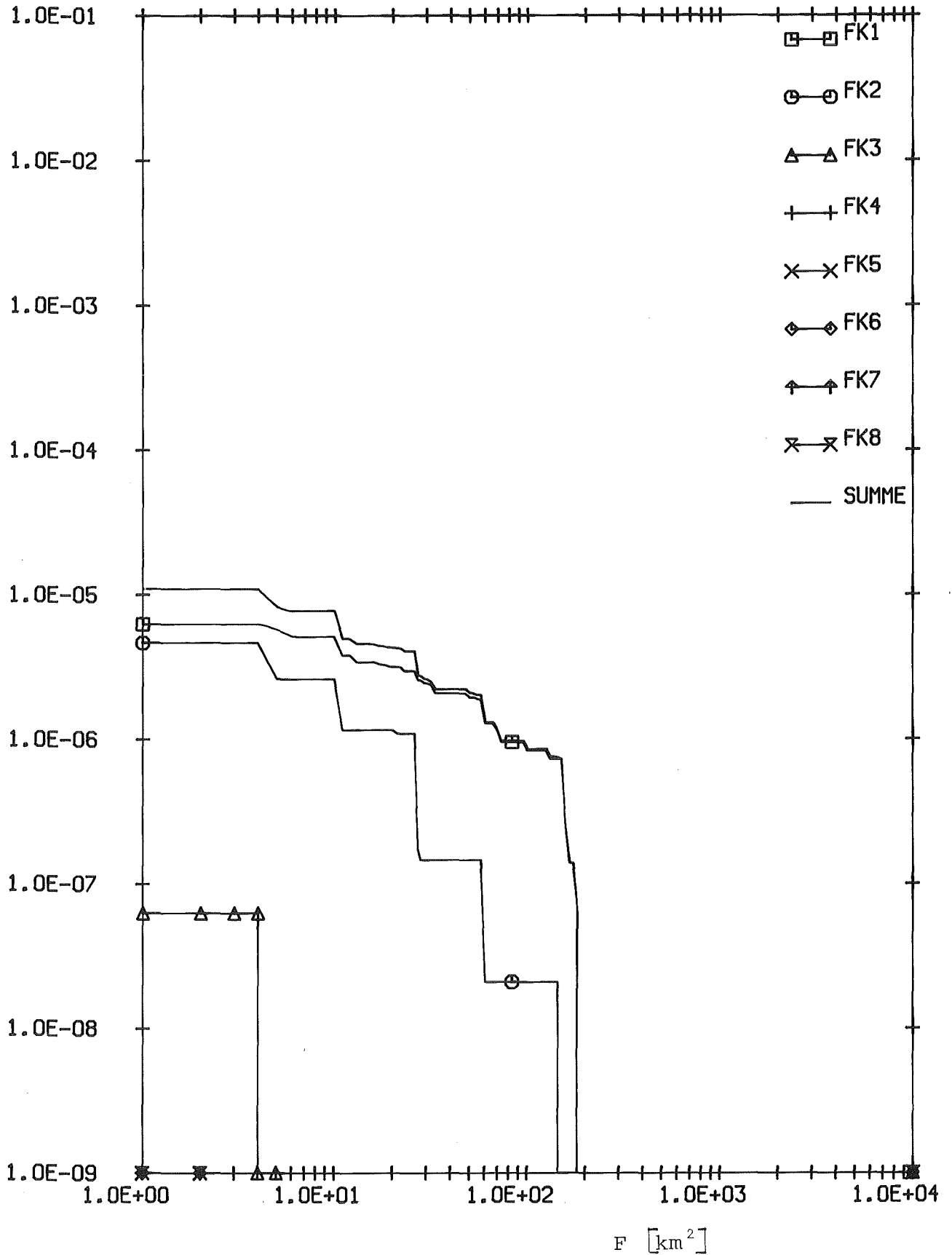


Abb. 20 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet B1+B2) betroffenen Flächen



Häufigkeit von Personenzahlen  $> P$  bei 25 Anlagen [ $a^{-1}$ ]

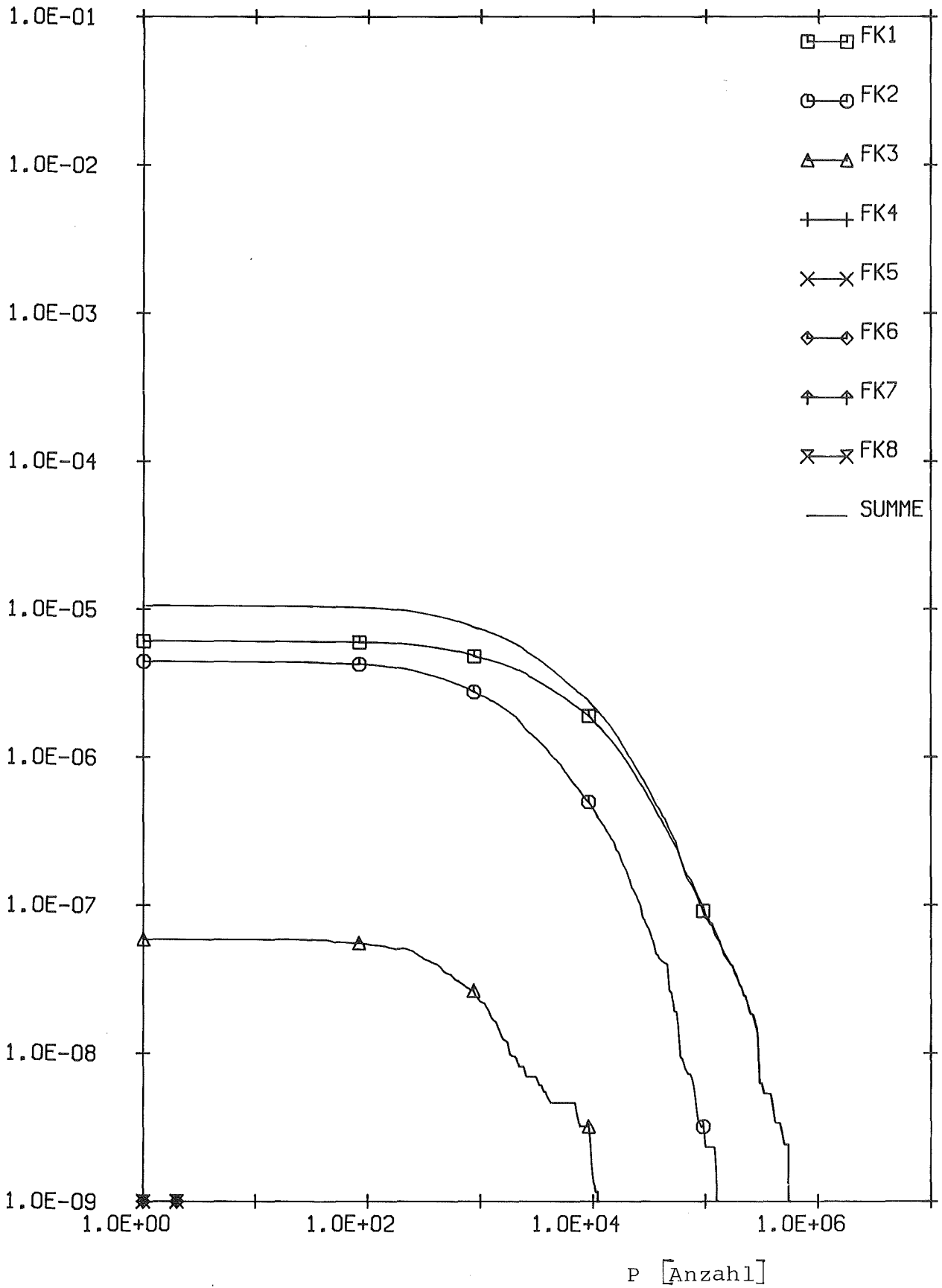


Abb. 21 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Schnelle Umsiedlung" (Gebiet B1+B2) betroffenen Personenzahlen

Häufigkeit von Flächen  $\geq F$  bei 25 Anlagen [ $a^{-1}$ ]

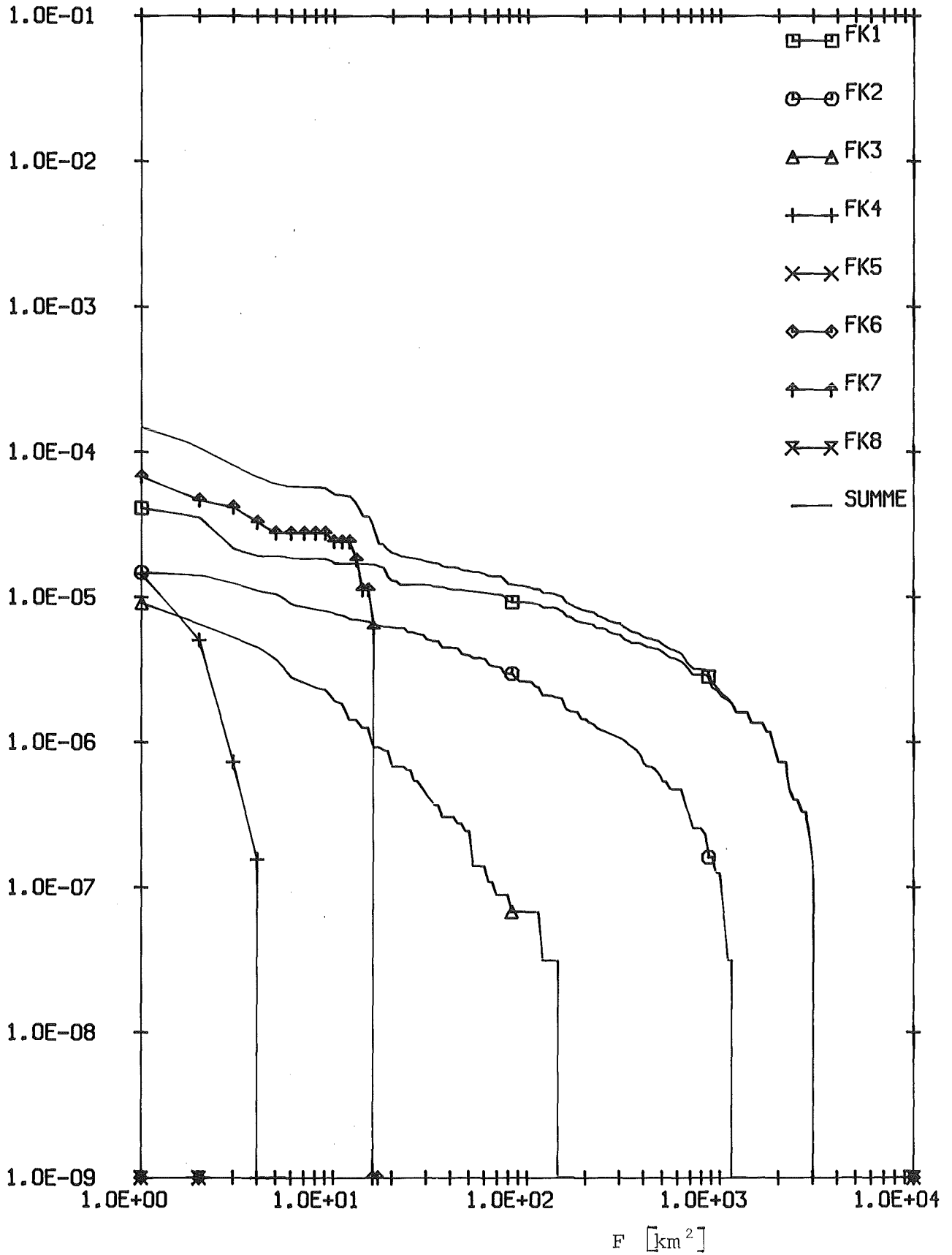


Abb. 22 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Flächen

Häufigkeit von Personenzahlen  $\geq P$  bei 25 Anlagen [ $a^{-1}$ ]

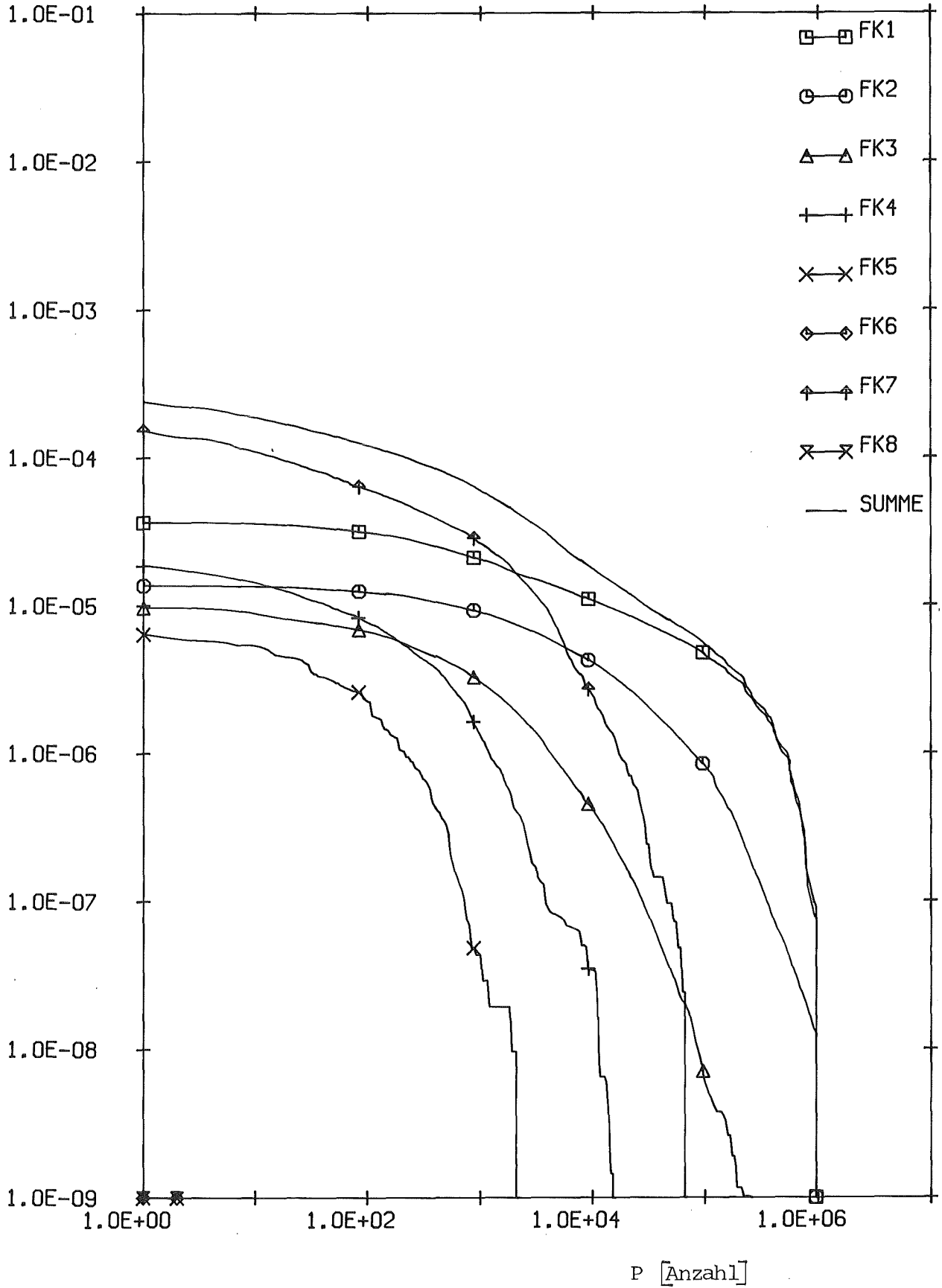


Abb. 23 Komplementäre kumulative Häufigkeitsverteilung der von der Schutz- und Gegenmaßnahme "Umsiedlung" (Gebiet C) betroffenen Personenzahlen

Mittleres Individualrisiko für akuten Tod [ $a^{-1}$ ]

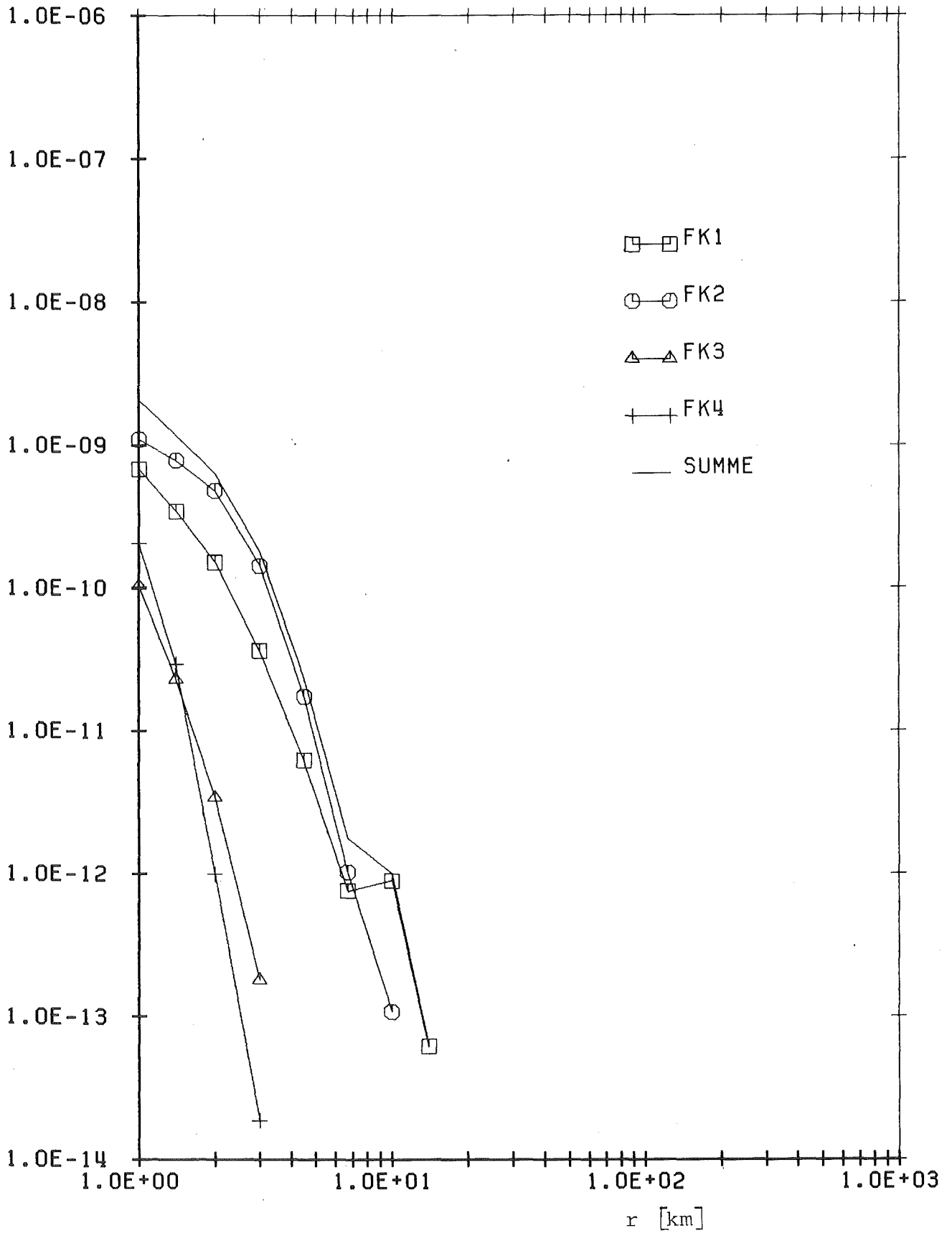


Abb. 24 Mittleres entfernungsabhängiges Individualrisiko für Fröhschäden (akuter Tod), normiert auf eine Anlage

Mittleres Individualrisiko für Tod durch Leukämie oder Krebs [ $a^{-1}$ ]

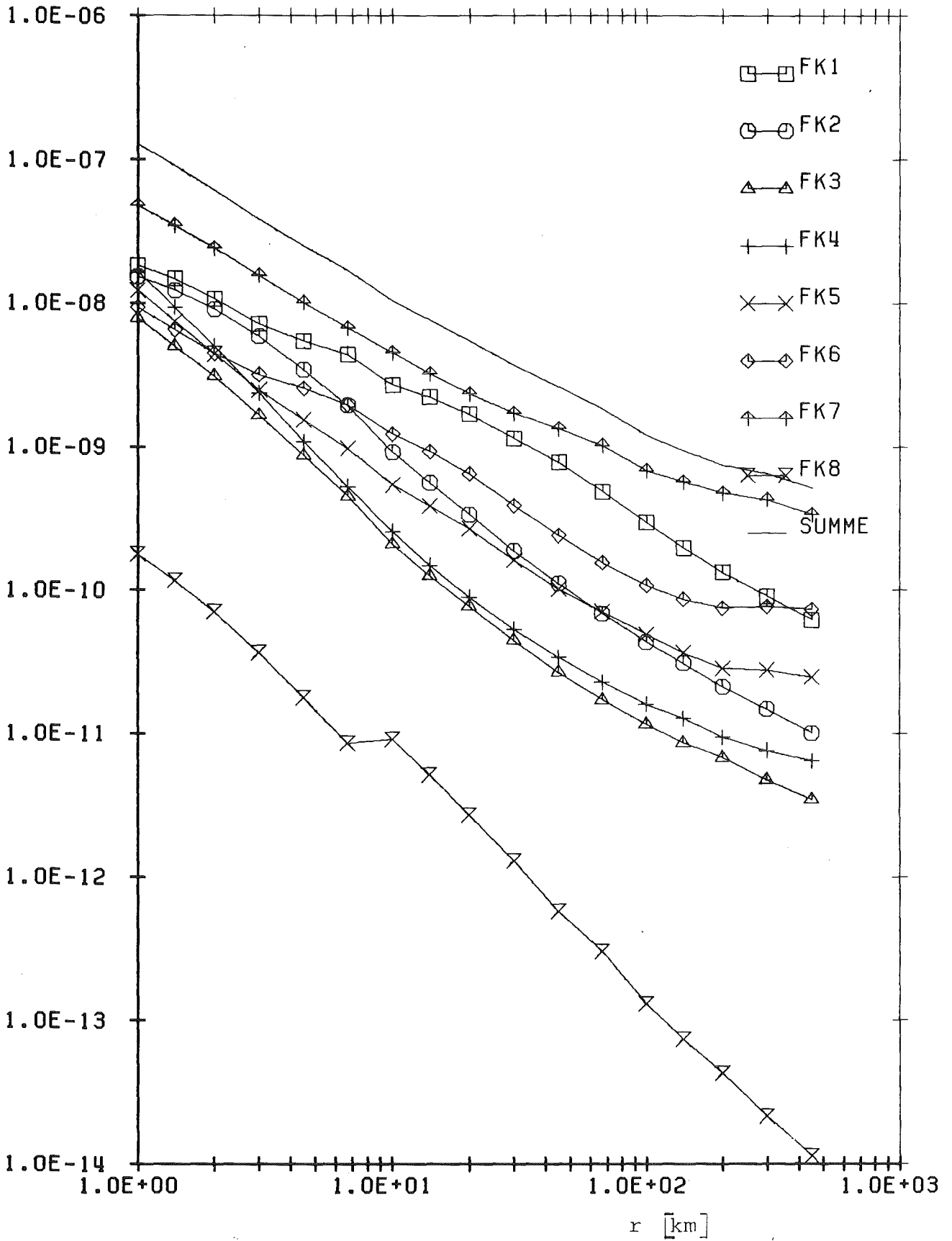


Abb. 25a Mittleres entfernungsabhängiges Individualrisiko für Spätschäden bei den lebenden Generationen (LG), normiert auf eine Anlage

Mittleres Individualrisiko für Tod durch Leukämie oder Krebs [ $a^{-1}$ ]

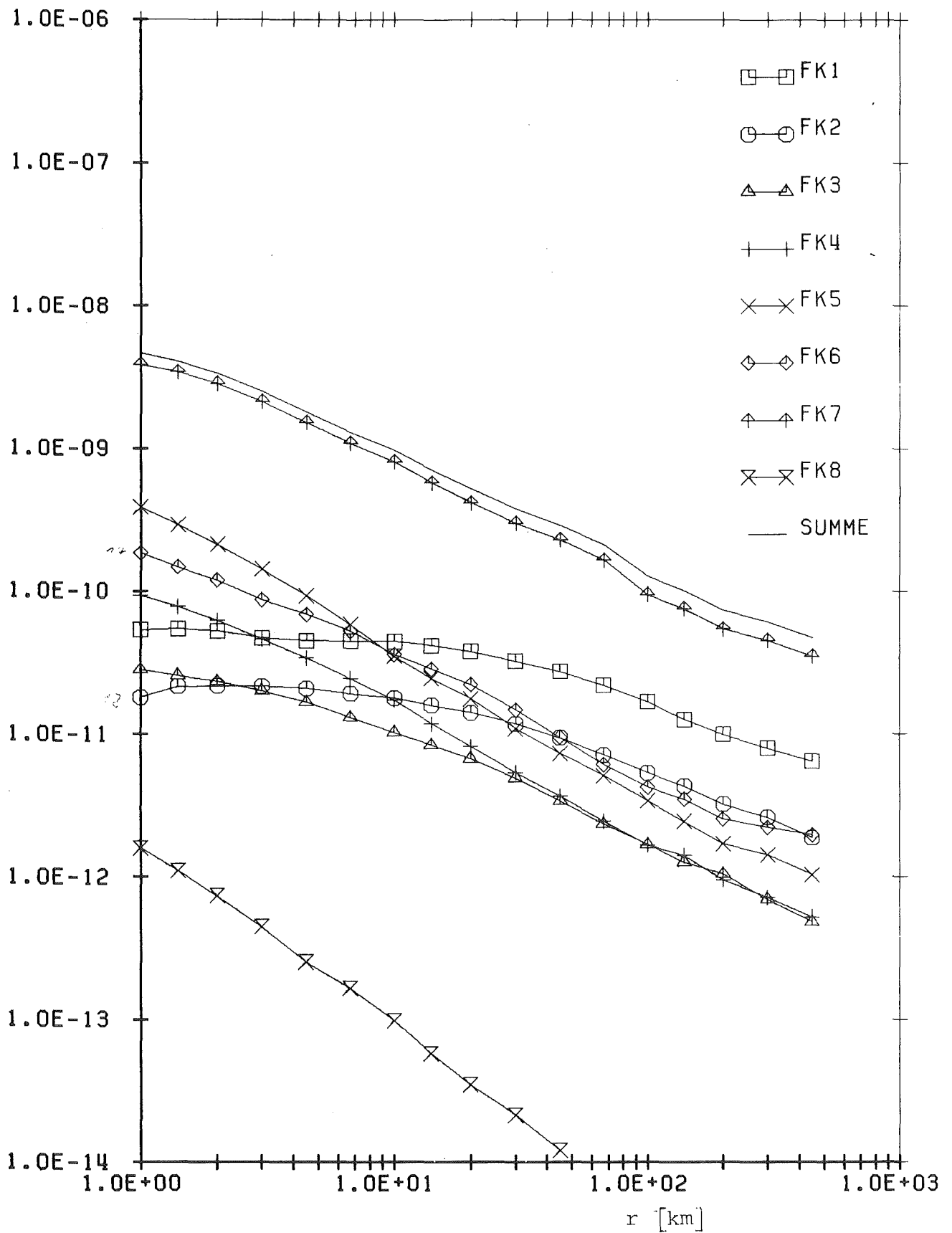


Abb. 25b Mittleres entfernungsabhängiges Individualrisiko für Spätschäden bei den folgenden Generationen (FG), normiert auf eine Anlage